

Kosten-Wirksamkeits- und Stakeholder-Analyse von Systemen zur Unfallvermeidung in Straßentunneln

Dem Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
eingereichte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Gabriele Wolf

geb. in Lindenfels

Berichterstatter: Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze

Tag der Einreichung: 31.05.2010
Tag der mündlichen Prüfung: 16.07.2010

Darmstadt 2010
D17

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	III
Abkürzungen und Akronyme	VI
Formelzeichen	IX
Zusammenfassung	X
1. Einleitung	1
1.1. Motivation und Zielsetzung	1
1.2. Aufbau der Arbeit	2
1.3. Begriffe und Definitionen	3
2. Ausgangslage	8
2.1. Entwicklung des Unfallgeschehens in der Europäischen Union	8
2.2. Besondere Gefahren von Tunnelunfällen	10
2.2.1. Geringe Risikotoleranz	10
2.2.2. Rettungswege	11
2.2.3. Feuer	11
2.3. Stand der Forschung Tunnelsicherheit	12
2.3.1. UNECE: Ad hoc-Arbeitsgruppe Tunnelsicherheit	12
2.3.2. Projekte innerhalb des 5. EU-Rahmenprogramms	14
2.3.3. Projekte innerhalb des 6. EU-Rahmenprogramms	19
2.3.4. Nationale Forschungsprojekte	21
2.4. Stand der Technik Tunnelsicherheit	22
2.4.1. Richtlinie über die Mindestanforderungen an die Sicherheit von Straßentunneln	23
2.4.2. Ergebnisse der EuroTAP-Tunnelbewertung	25
2.5. Fazit zum Stand der Forschung und Technik	26
3. Erfassung und Analyse des Unfallgeschehens in Straßentunneln	27
3.1. Erfassung des Unfallgeschehens	27
3.1.1. Tunnelunfälle in Österreich	28
3.1.2. Tunnelunfälle in der Schweiz	29
3.2. Einflussfaktoren auf das Unfallgeschehen	31
3.2.1. Fahrerbezogene Einflüsse	31
3.2.2. Verkehrsbedingte und bauliche Einflüsse	33
3.3. Unfalltypen	35
3.4. Unfallursachen	37
3.4.1. Verteilung der Unfallursachen	37
3.4.2. Unfallbeteiligte und -verursacher	40
3.5. Fazit zum Unfallgeschehen in Straßentunneln	41
4. Unfallvermeidung in Straßentunneln	42
4.1. Abgrenzung des Untersuchungsgegenstands	42
4.1.1. Unfalltypen	42
4.1.2. Unfallursachen	42
4.1.3. Unfallbeteiligte	43

4.1.4.	Tunnelcharakteristika	44
4.2.	Systemauswahl	45
4.2.1.	Assistenzkonzepte	45
4.2.2.	Auffahrunfall	46
4.2.3.	Alleinunfall	49
4.2.4.	Zusammenfassung Systemauswahl	49
5.	Sozio-ökonomische Bewertung	50
5.1.	Verfahren der Wirtschaftlichkeitsanalyse	50
5.2.	Grundlagen der Kosten-Wirksamkeitsanalyse	55
5.2.1.	Ablauf	55
5.2.2.	Wirksamkeit	56
5.2.3.	Kosten	59
5.2.4.	Zeithorizont und Marktdurchdringung	62
5.2.5.	Datenquellen	65
5.2.6.	Zusammenfassung der Randbedingungen	66
5.3.	Durchführung der Bewertung	66
5.3.1.	Das Vergleichsszenario <i>Ohne-Fall</i>	66
5.3.2.	Moving Spot Light System	67
5.3.3.	I2C-Abstandswarnung	71
5.3.4.	Section Control	79
5.3.5.	Intelligent Speed Adaptation	81
5.3.6.	Vergleich von Kosten und Wirksamkeit der ausgewählten Systeme	88
5.3.7.	Sensitivitätsanalyse	92
5.3.8.	Zusammenfassung der Kosten-Wirksamkeitsanalyse	94
6.	Stakeholder-Analyse	96
6.1.	Identifikation der Stakeholder	97
6.2.	Ziele und Interessen der Stakeholder	98
6.2.1.	Tunnelbetreiber	98
6.2.2.	Fahrzeughersteller	100
6.2.3.	Tunnelnutzer	102
6.3.	Einschätzung der Systeme aus Sicht der Stakeholder	112
6.3.1.	Öffentliche Tunnelbetreiber	112
6.3.2.	Private Tunnelbetreiber und Fahrzeughersteller	114
6.3.3.	Tunnelnutzer	115
6.4.	Zusammenfassung der Stakeholder-Analyse	120
7.	Synthese von Kosten-Wirksamkeits- und Stakeholder-Analyse	121
8.	Fazit	123
9.	Ausblick	125
Anhang	128
A1.	Allgemeine Eingangsdaten	128
A1.1.	Datenbasis Tunnel	128
A1.2.	Entwicklung des Pkw-Bestands in Österreich	131

A2.	Eingangsdaten <i>best guess</i> -Szenario.....	132
A2.1.	Geschätzte Entwicklung der Ausstattung mit I2C-Abstandswarnung	132
A2.2.	Geschätzte Entwicklung der Ausstattung mit Intelligent Speed Adaptation.....	133
A2.3.	Kosten und Wirksamkeit Moving Spot Light System.....	134
A2.4.	Kosten und Wirksamkeit I2C-Abstandswarnung	135
A2.5.	Kosten und Wirksamkeit Section Control	136
A2.6.	Kosten und Wirksamkeit Intelligent Speed Adaptation.....	137
A3.	Eingangsdaten <i>best case</i> -Szenario.....	138
A3.1.	Geschätzte Entwicklung der Ausstattung mit I2C-Abstandswarnung	138
A3.2.	Geschätzte Entwicklung der Ausstattung mit Intelligent Speed Adaptation.....	139
A3.3.	Kosten und Wirksamkeit Moving Spot Light System.....	140
A3.4.	Kosten und Wirksamkeit I2C-Abstandswarnung	141
A3.5.	Kosten und Wirksamkeit Section Control	142
A3.6.	Kosten und Wirksamkeit Intelligent Speed Adaptation.....	143
A3.7.	Barwerte der Systeme im <i>best case</i>	144
A4.	Eingangsdaten <i>worst case</i> -Szenario	146
A4.1.	Geschätzte Entwicklung der Ausstattung mit I2C-Abstandswarnung	146
A4.2.	Geschätzte Entwicklung der Ausstattung mit Intelligent Speed Adaptation.....	147
A4.3.	Kosten und Wirksamkeit Moving Spot Light System.....	148
A4.4.	Kosten und Wirksamkeit I2C-Abstandswarnung	149
A4.5.	Kosten und Wirksamkeit Section Control	150
A4.6.	Kosten und Wirksamkeit Intelligent Speed Adaptation.....	151
A4.7.	Barwerte der Systeme im <i>worst case</i>	152
A5.	Kosten-Wirksamkeitsverhältnis der kooperativen Systeme	154
A6.	Unfälle im Mont Blanc-, Tauern- und St. Gotthard-Tunnel.....	156
A6.1.	Mont Blanc	156
A6.2.	Tauern.....	156
A6.3.	St. Gotthard	157
A6.4.	Einordnung der drei Unfälle.....	157
	Quellenverzeichnis	159

Abkürzungen und Akronyme

Abkürzung/Akronym

ABS	Anti-Blockier-System
ACC	Adaptive Cruise Control
ACS	Automated Control Systems
ACTEURS	Amélioration du Couplage Tunnel-Exploitant-Usager pour Renforcer la Sécurité
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
ADVISORS	Action for advanced driver assistance and vehicle control systems implementation, standardization, optimum use of the road network and safety
APRR	Autoroutes Paris-Rhin-Rhône
AREA	Société des Autoroutes Rhône-Alpes
ASEACAP	Association Européenne des Autoroutes, Ponts et Tunnels à péage
ASFINAG	Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft
AT	Österreich
ATMB	Autoroutes et Tunnel du Mont Blanc
AU\$	Australische Dollar
AVCSS	Automated Vehicle Control and Systems
AVG	Automated Vehicle Guidance
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BE	Belgien
BF	Bereichsforderung
bfu	Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung
C2C	car-to-car
C2I	car-to-infrastructure
CARE	Community data base on Accidents on the Roads in Europe
CCVE	Closed Circuit Video Equipment
CIS	Commonwealth of Independant States, die Mitgliedsstaaten sind: Armenien, Aserbaidschan, Weißrussland, Kasachstan, Kirgisistan, Moldawien, Russland, Tadschikistan, Turkmenistan (inoffiziell), Ukraine (inoffiziell) und Usbekistan.
CMS	Changeable Message Sign
CODIA	Co-operative systems deployment impact assessment
COMeSafety	Communications for eSafety
COOPERS	Communication Technologies for Cooperative Systems
COSUF	Committee on Operational Safety of Underground Facilities
CVIS	Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems
DARTS	Durable and Reliable Tunnel Structures
DE	Deutschland
DK	Dänemark
DSRC	Dedicated Short Range Communication
DVR	Deutscher Verkehrssicherheitsrat
EC	European Commission
eCall	Emergency Call

Abkürzung/Akronym

eIMPACT	Socio-economic Impact Assessment of Stand-alone and Co-operative Intelligent Vehicle Safety Systems (IVSS) in Europe
EL	Estland
ES	Spanien
eSafety	electronic safety
ESCOTA	Société des Autoroutes Estérel, Côte d'Azur, Provence, Alpes
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EU	Europäische Union
EuroTAP	European Tunnel Assessment Programme
FDW	Following Distance Warning
FF	Festforderung
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
FI	Finnland
FIA	Fédération Internationale de l'Automobile
FIT	Fire in Tunnels
FR	Frankreich
Fzg.	Fahrzeug
Fzg.-km	Fahrzeug-Kilometer, Einheit der Fahrleistung
GG	Grundgesetz
HEATCO	Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment
HGrG	Haushaltsgrundsätzegesetz
I2C	infrastructure-to-car
IATSS	International Association of Traffic and Safety Sciences
IE	Irland
IEEE	Institute of Electric and Electronic Engineers
ifeu	Institut für Energie- und Umweltforschung
IN-SAFETY	Infrastructure and Safety
ISA	Intelligent Speed Adaptation
IT	Italien
ITA	International Tunneling Association
ITA-COSUF	International Tunneling Association Committee on Operational Safety of Underground Facilities
ITC	Inland Transport Committee (der UNECE)
ITS	Intelligent Transportation Systems
ITSS	Intelligent Transportation Systems and Services
IVSS	Intelligent Vehicle Safety Systems
LED	Light Emitting Diode
L-surF	Design Study for a Large Scale Underground Research Facility on Safety and Security
LU	Luxemburg
n. s.	nicht signifikant
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
NL	Niederlande

Abkürzung/Akronym

ÖAMTC	Österreichischer Automobil-, Motorrad- und Touring-Club
OBU	On Board Unit
OECD	Organization for Economic Cooperation and Development
OEM	Original Equipment Manufacturer
PIARC	World Road Association
PT	Portugal
RABT	Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln
RACC	Reial Automobile Club de Catalunya
RCW	Reverse Collision Warning
REACT	Realizing Enhanced Safety and Efficiency in European Road Transport
ROSEBUD	Road Safety and Environmental Benefit-Cost and Cost-Effectiveness Analysis for Use in Decision-Making
RSU	Road Side Unit
SafeT	Safety in Tunnels
SARTRE	Social Attitudes to Road Traffic Risk in Europe
SBR	Seat Belt Reminder
SE	Schweden
SEISS	Exploratory Study on the Potential Socio-economic Impact of the Introduction of Intelligent Safety Systems
SFTRF	Société française du tunnel routier du Fréjus
SIM-TD	Sichere, intelligente Mobilität – Testfeld Deutschland
SIRTAKI	Safety Improvement in Road and Rail Tunnels Using Advanced Information Technologies and Knowledge Intensive Decision Support Models
SITAF	Società Italiana Traforo Autostradale del Frejus
STSG	Straßentunnel-Sicherheitsgesetz
SUNflower-Staaten	Schweden, United Kingdom, Norwegen
TCC	Traffic Control Centre
TCRP	Transit Cooperative Research Program
TERN	Trans-European Road Network
TOI	Transportøkonomisk Institutt (Norwegen)
TUNCONSTRUCT	Tunnel Construction
UDV	Unfallforschung der Versicherer
UK	Groß-Britannien
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
UPTUN	Upgrading Existing Tunnels
VAMA	Videoabstandsmessanlage
VMS	Variable Message Sign
VSC	Vehicle Safety Communications
VSC-A	Vehicle Safety Communications-Applications
W	Wunsch
WLAN	Wireless Local Area Network
ZF	Zielforderung

Formelzeichen

Formelzeichen

d	Abstand
DTV	durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke
G	Anzahl der Getöteten
$G_{R,\ddot{O}}$	Getötetenrate, Definition nach Robatsch/Nussbaumer, Österreich
K_t	Kosten in Periode t
l	Länge
n	Zeithorizont
r	Diskontierungssatz
t	Laufvariable
τ	Zeitlücke
U	Anzahl der Unfälle
UPS	Anzahl der Unfälle mit Personenschaden
$U_{R,\ddot{O}}$	Unfallrate, Definition nach Robatsch/Nussbauer, Österreich
$U_{R,S}$	Unfallrate, Definition nach Salvisberg et al., Schweiz
V	Anzahl der Verunglückten bzw. Verunfallten
v	Geschwindigkeit
$V_{R,\ddot{O}}$	Verunglücktenrate, Definition nach Robatsch/Nussbauer, Österreich
$V_{R,S}$	Verunglücktenrate, Definition nach Salvisberg et al., Schweiz

Zusammenfassung

Unfälle in Straßentunneln sind seltene Ereignisse, können aufgrund der räumlichen Gegebenheiten jedoch weit schwerwiegendere Konsequenzen haben als ein vergleichbares Ereignis auf einem nicht überbauten Streckenabschnitt. Die Erhöhung der Verkehrssicherheit von Straßentunneln durch unfallvermeidende und folgenmindernde Maßnahmen ist daher Gegenstand einer Vielzahl von Projekten. Wenig Berücksichtigung fanden dabei bisher die Fahrzeuge der Tunnelnutzer, obwohl sie ein wesentliches Element des Systems Straßentunnel darstellen. Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit war die Hypothese, dass der Einsatz kooperativer Systeme Synergien schaffen und einen wesentlichen Beitrag zur Unfallvermeidung in Straßentunneln leisten könnte.

Ausgehend von einer Analyse des Unfallgeschehens in Straßentunneln in Österreich wurden für die beiden häufigsten Unfalltypen Auffahrunfall und Alleinunfall je ein kooperatives und ein rein infrastrukturbasiertes System ausgewählt. Dabei wurde vereinfacht von einem unikausalen Zusammenhang zwischen Unfalltyp und Unfallursache ausgegangen, d. h. ein zu geringer Sicherheitsabstand als Ursache für den Auffahrunfall und eine zu hohe Fahrgeschwindigkeit als Ursache für den Alleinunfall angenommen.

In einer Kosten-Wirksamkeitsanalyse wurden die vier ausgewählten Systeme – Moving Spot Light System, Infrastructure-to-Car-Abstandswarnung, Section Control und Intelligent Speed Adaptation – aus gesamtgesellschaftlicher Perspektive untersucht und für einen Betrachtungszeitraum von zehn Jahren das jeweilige Kosten-Wirksamkeitsverhältnis bestimmt. Ergebnis dieser Analyse ist, dass die kooperativen Systeme ungünstigere Kosten-Wirksamkeitsverhältnisse aufweisen als die rein infrastrukturbasierten Systeme. Ursache dafür sind zum einen die hohen Kosten, die für die Ausrüstung der Fahrzeuge anfallen, zum anderen die eingeschränkte Nutzenentfaltung, die mit einer zunächst geringen Verbreitung einhergeht.

Eine weitere Bewertung der vier ausgewählten Systeme erfolgte im Rahmen einer Stakeholder-Analyse, in der die individuellen Interessen der Tunnelbetreiber, Fahrzeughersteller sowie der Tunnelnutzer dargestellt und den vier Systemen gegenübergestellt wurden. In dieser Analyse wurde besonderes Augenmerk auf die Stakeholder Tunnelnutzer bzw. Pkw-Fahrer gelegt, da deren Akzeptanz für den Erfolg der Systeme entscheidend ist. Als Ergebnis liefert die Stakeholder-Analyse ein heterogenes Bild, da die vier Systeme von den drei Gruppen der Stakeholder sehr unterschiedlich eingeschätzt werden. Die größte Übereinstimmung besteht bei Section Control, das aus Sicht der Nutzer und Betreiber positiv, aus Sicht der Fahrzeughersteller indifferent zu bewerten ist. In Bezug auf die kooperativen Systeme sind Datenschutz und Datensicherheit ein besonderes Anliegen der Nutzer. Die Gestaltung der Systeme in dieser Hinsicht wird die Nutzerakzeptanz maßgeblich beeinflussen.

Als Ergebnis der beiden Teilbewertung ist festzuhalten, dass kooperative Systeme im betrachteten Zeithorizont den rein infrastrukturbasierten sowohl bezogen auf ihr Kosten-Wirksamkeitsverhältnis als auch die Akzeptanz der Stakeholder unterlegen sind. Die Annahme, dass eine Interaktion von Fahrzeug- und Tunnelsystemen Synergien in Bezug auf die Tunnelsicherheit schafft, muss somit verworfen werden.

1. Einleitung

1.1. Motivation und Zielsetzung

Straßentunnel sind wichtige Elemente der Verkehrssysteme, sowohl innerhalb einer Region oder eines Staates als auch im grenzüberschreitenden Gesamtzusammenhang. Dank zahlreicher Forschungsprojekte und der Einführung neuer Systeme zur Verkehrsüberwachung und -leitung zählen Straßentunnel zu den sichersten Strecken mit einer geringeren Zahl an Unfällen als nicht überbaute Abschnitte. Gleichwohl kann ein Unfall in einem Straßentunnel aufgrund der räumlichen Enge und begrenzten Flucht- und Ausweichmöglichkeiten weit schwerwiegendere Folgen haben als ein vergleichbares Ereignis auf einer nicht überbauten Autobahn oder Landstraße.¹ Besonders schlimm kann sich eine solche Situation entwickeln, wenn ein Feuer ausbricht und Lkw einschließlich Ladung in Brand geraten. Welch verheerende Auswirkungen ein solches Ereignis haben kann, zeigte der Unfall im Mont Blanc-Tunnel im März 1999, bei dem 39 Menschen starben.²

Vor diesem Hintergrund ist nachvollziehbar, dass sich sowohl nationale als auch internationale Forschungsprojekte zum Thema Tunnelsicherheit überwiegend mit Fragestellungen im Zusammenhang mit Feuer befassen: Brandentdeckung, Brandbekämpfung, Rettung im Brandfall, Konstruktion feuersicherer Tunnel etc. Es gibt jedoch weit mehr Größen, die einen Einfluss auf die Sicherheit von Straßentunneln haben, wie Tabelle 1 zeigt.

Tabelle 1: Einflussgrößen auf die Sicherheit von Straßentunneln³

Bereich	Beispiele für Einflussgrößen
Infrastruktur	Instandhaltung, Notausgänge
Tunnelbetrieb	Unterhalt, Personal
Fahrer	Verhalten, aktueller Zustand
Fahrzeug	Wartung, Ausstattung
Rettungsdienste	Sanitäter, Feuerwehr
Verkehrspolizei	Kontrollen, Überwachung
Verkehrspolitik	lokal, europäisch

Optimale Tunnelsicherheit setzt voraus, dass alle diese Elemente ihre jeweiligen Aufgaben und Handlungen fehlerfrei ausführen und das Zusammenspiel einzelner Funktionen reibungslos funktioniert. Der Bereich der Rettung und Selbstrettung ist dabei von großer Wichtigkeit, wozu auch Trainingsmaßnahmen von Rettungskräften oder Aufklärungskampagnen für das korrekte Verhalten von Tunnelnutzern im Notfall zählen. Diesen Maßnahmen, die erst dann zum Tragen kommen, wenn sich bereits ein Vorfall ereignet hat, steht die Prävention entgegen, deren Ziel es ist, Unfälle und Brandentstehung von

¹ Siehe z. B.: Knoflacher, H.; Pfaffenbichler, P.; Nussbaumer, H.: Quantitative Risikoanalyse für österreichische Straßentunnel. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg.): Schriftenreihe Straßenforschung Heft 548, Wien, 2005, S. 12.

² Siehe Anhang A6.

³ Eigene Darstellung in Anlehnung an Steiner, W.: Betriebsorganisation Gotthard Strassentunnel. 4. Internationaler Fachkongress Verkehr und Sicherheit in Straßentunneln, 25.-27. April 2007 in Hamburg, S. 12.

vornherein zu vermeiden. Auf dem Gebiet der Unfallvermeidung konnten insbesondere im Bereich der Fahrzeugtechnik in den letzten 15 Jahren große Fortschritte erzielt werden, z. B. durch die Serieneinführung des Elektronischen Stabilitätsprogramms (ESP) durch Bosch im Jahr 1995. Seither wurden viele weitere sog. Fahrerassistenzsysteme entwickelt, die den Fahrer bei seiner Fahraufgabe unterstützen und im Notfall eingreifen können, um einen Unfall zu vermeiden. Derzeit werden neben diesen Systemen, die auf dem Einsatz von umfelderfassenden Sensoren basieren, auch Anwendungen auf Basis von Kommunikationstechnologien entwickelt. Das Potential dieser sog. kooperativen Systeme für die Erhöhung der Verkehrssicherheit von Straßentunneln wurde bislang nicht untersucht, obwohl gerade diese Umgebung für den Einsatz dieser Systeme prädestiniert scheint. Straßentunnel sind nach dem aktuellen Stand der Technik ohnehin mit einer Vielzahl an Systemen zur Verkehrsüberwachung und -steuerung sowie mit Kommunikationseinrichtungen ausgerüstet, die im Zusammenspiel mit Fahrzeugsystemen einen wesentlichen Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit leisten könnten.

Ziel dieser Arbeit ist es, kooperative und rein infrastrukturbasierte Systeme hinsichtlich ihres Potentials zur Erhöhung der Verkehrssicherheit von Straßentunneln zu bewerten und miteinander zu vergleichen. Zur Prüfung der Hypothese, dass die Sicherheitswirkung kooperativer Systeme höher ist als die rein infrastrukturbasierter, werden eine Kosten-Wirksamkeitsanalyse und eine Stakeholder-Analyse durchgeführt.

1.2. Aufbau der Arbeit

Nach einer Einleitung und der Definition einiger Begriffe in diesem **1. Kapitel** erfolgt in **Kapitel 2** zunächst eine Analyse der Ausgangslage. Hierzu zählt die Darstellung des Stands der Forschung sowie des Stands der Technik im Hinblick auf die Verkehrssicherheit in Straßentunneln. Im anschließenden **Kapitel 3** werden das Unfallgeschehen in Straßentunneln analysiert und die häufigsten Unfallursachen erläutert. Dies bildet die Basis für die Identifikation von Systemen zur Unfallvermeidung in Straßentunneln in **Kapitel 4**. Die ausgewählten Systeme werden einem zweiteiligen Bewertungsprozess unterzogen. In **Kapitel 5** erfolgt zunächst eine Bewertung aus gesamtgesellschaftlicher Sicht in Form einer Kosten-Wirksamkeitsanalyse. Dabei wird die Wirksamkeit der Systeme, d. h. ihr Unfallvermeidungspotential, den mit der Umsetzung verbundenen Kosten gegenübergestellt. Im folgenden **Kapitel 6** werden die Maßnahmen aus dem Blickwinkel der relevanten Interessengruppen (Stakeholder) bewertet, da für eine umfassende Beurteilung sowohl die kollektiven als auch die jeweiligen individuellen Ziele und Interessen von Bedeutung sind. Ein zentrales Kriterium der individuellen Beurteilung ist dabei die Akzeptanz der Maßnahmen durch die einzelnen Interessengruppen. Die Synthese der beiden Teilbewertungen ist Gegenstand von **Kapitel 7**, das mit dem abschließenden Bewertungsergebnis endet. Das Fazit der Arbeit wird in **Kapitel 8** gezogen und einen Ausblick auf weitere Forschungsvorhaben liefert **Kapitel 9**.

1.3. Begriffe und Definitionen

Tunnel, freie Strecke

Tunnel sind unterirdische Verkehrsanlagen, die meist dem Eisenbahn- oder dem motorisierten Individual- und Güterverkehr dienen. Letztere werden als Straßentunnel bezeichnet. Das Gegenteil, eine nicht überbaute, knotenpunktfreie Streckenführung außerhalb von Ortsdurchfahrten, ist eine sog. freie Strecke.⁴

Verkehrsart

Straßentunnel können auf verschiedene Weisen betrieben werden. Es gibt entweder nur Fahrstreifen, die in eine Richtung führen, oder die Fahrzeuge durchfahren den Tunnel innerhalb einer Röhre in beiden Richtungen. Daneben gibt es auch Tunnel, in denen der Verkehr abwechselnd in die eine oder andere Richtung fließt, was als alternierender Einbahnbetrieb bezeichnet wird. Für diese Verkehrsarten existieren unterschiedliche Bezeichnungen, die in Tabelle 2 zusammengestellt sind.

Tabelle 2: Bezeichnungen für die Verkehrsart von Straßentunneln

Verkehrstrom innerhalb einer Röhre in 1 Richtung	Verkehrstrom innerhalb einer Röhre in 2 Richtungen
Richtungsverkehr	Gegenverkehr
Gleichstrom	Gegenstrom
uni-direktional	bi-direktional
einröhrig	zweiröhrig

Das letztgenannte Begriffspaar einröhrig/zweiröhrig kommt in der Literatur vereinzelt vor, ist jedoch nicht eindeutig, da auch in einem einröhriigen Tunnel der Verkehr bi-direktional fließen kann. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Begriffe Richtungsverkehr und Gegenverkehr verwendet.

Infrastruktur

Wird der Begriff Infrastruktur sehr weit gefasst, so steht er für alle technischen Systeme und Einrichtungen, die sich in einem Tunnel befinden, und ebenso für seine Bestandteile und Materialien, die ihn zu einem Teil der Verkehrsinfrastruktur machen.⁵ Im Rahmen dieser Arbeit wird Infrastruktur stellvertretend für alle Systeme zur Verkehrsleitung, Verkehrsüberwachung und Kommunikation einschließlich der Leitzentrale verwendet.

Fahrerassistenzsystem, aktive und passive Sicherheit

Fahrerassistenzsystem ist der Überbegriff zu einer Reihe von Systemen, die den Fahrer bei der Ausführung seiner Fahraufgabe unterstützen. Dies kann auf den Ebenen der Navigation, der Fahrzeugführung oder der Stabilisierung erfolgen, z. B. durch ein Naviga-

⁴ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (Hrsg.): Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Linienführung (RAS-L). FGSV-Nr. 296. Köln, 1999, S. 5.

⁵ Bergmeister, K.; Francescon, S.: UPTUN Report, Comprehensive Inventory of Tunnel Safety Features, 2004. Nach: Sajtar, L.; Walet, F.; Wielinga, L.: Integrated Approach to Road Tunnel Safety - PIARC Report 2007R07. PIARC Technical Committee C3.3 Road Tunnel Operation, La Défense Cedex, 2007, S. 51.

tionsgerät, eine automatische Abstandsregelung oder ein elektronisches Stabilitätsprogramm. Diese Systeme unterstützen den Fahrer bei der Aufnahme und Verarbeitung von Informationen oder durch Eingriffe in die Fahrzeugführung und sollen dazu beitragen, Fehlhandlungen des Fahrers zu verhindern bzw. die Folgen von Fehlhandlungen zu mindern. Fahrerassistenzsysteme zählen daher zum Bereich der sog. aktiven Sicherheit, deren Ziel es ist, das Eintreten von Unfällen zu vermeiden. Im Gegensatz dazu ist es das Ziel von passiven Sicherheitssystemen, die Fahrzeuginsassen während eines Unfalls zu schützen und die Auswirkungen so gering wie möglich zu halten. Beispiele für Systeme der passiven Sicherheit sind Gurtstraffer, Airbags, Knautschzone und versteifte Fahrgastzelle. Die Einführung und kontinuierliche Verbesserung von Systemen der passiven Sicherheit hat maßgeblich zum Rückgang der Getöteten und Verletzten im deutschen Straßenverkehr zwischen 1970 und 2008 (21.332 im Vergleich zu 4.467 Getöteten) beigetragen.⁶ Nach allgemein verbreiteter Einschätzung ist das Potential der passiven Sicherheit mit dem heutigen Stand der Technik allerdings weitgehend ausgereizt.⁷ Es gibt neuere Bemühungen des sog. Partnerschutzes, bei dem die passive Sicherheit auf ungeschützte Unfallbeteiligte wie z. B. Fußgänger und Radfahrer ausgedehnt wird. Ein Beispiel hierfür ist die aktive Motorhaube, z. B. von Daimler⁸, die sich bei einer Kollision aufstellt und so die Wucht des Aufpralls mindert.

Eine weitere Reduktion der Zahl der Getöteten ist nach herrschender Meinung nur mit Systemen der aktiven Sicherheit, d. h. Fahrerassistenzsystemen zu erreichen bzw. durch die Integration von passiver und aktiver Sicherheit.⁹ In der Literatur finden sich unterschiedliche Ansätze zur Klassifizierung dieser Systeme. Einige Möglichkeiten sind in Tabelle 3 wiedergegeben.

Tabelle 3: Klassifizierung von Fahrerassistenzsystemen¹⁰

Assistenzstrategie	Assistenzkonzept	Assistenzebene
Informieren	fahrzeugautonom	Navigationsebene
Warnen	infrastrukturbasiert	Bahnführungsebene
Intervenieren	kooperativ	Stabilisierungsebene
Agieren		

Bei den Assistenzstrategien wird nach Informationsdarbietung und Eingriffsniveau unterschieden. Zur Informationsdarbietung zählt das Informieren und Warnen, während Inter-

⁶ Statistisches Bundesamt: Verkehrsunfälle. <http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Statistiken/Verkehr/Verkehrsunfaelle/Aktuell,templateId=renderPrint.psml>, abgerufen am 10. April 2009.

⁷ Siehe z. B. Busch, S.: Entwicklung einer Bewertungsmethodik zur Prognose des Sicherheitsgewinns ausgewählter Fahrerassistenzsysteme. VDI Reihe 12 Nr. 588. VDI, Düsseldorf, 2005, S. 2; oder Ameling, C.: Steigerung der aktiven Sicherheit von Kraftfahrzeugen durch ein Kollisionsvermeidungssystem. VDI Reihe 12 Nr. 510. VDI, Düsseldorf, 2002, S. 105.

⁸ Daimler: Fußgängerschutz in der neuen E-Klasse. Pressemeldung vom 12. November 2008. <http://media.daimler.com/dcmedia/>, abgerufen am 9. Dezember 2008.

⁹ Schick, B.; Büttner, R.; Baltruschat, K. et al.: Methoden zur Bewertung von Funktion und Güte von Fahrerassistenzsystemen. VDI-Tagung Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung, VDI-Berichte Nr. 1990, 21.-22. Juni 2007 in Würzburg, S. 376.

¹⁰ Wiltshko, T.: Sichere Information durch infrastrukturgestützte Fahrerassistenzsysteme zur Steigerung der Verkehrssicherheit an Straßenknotenpunkten. VDI Reihe 12 Nr. 570. VDI, Düsseldorf, 2004, S. 38.

venieren und Agieren eine aktive Unterstützung bieten. Das Informieren des Fahrers durch ein Fahrerassistenzsystem erfolgt meist permanent. Im Gegensatz dazu erfolgt eine Warnung nur in bestimmten Gefahrensituationen und zielt darauf ab, den Fahrer zu einer Handlung zu veranlassen, um die Gefahrensituation zu beheben. Ein aktiver Eingriff des Systems erfolgt nicht.

Beim Intervenieren tritt eine Beeinflussung des Bewegungsverhaltens des Fahrzeugs durch das Fahrerassistenzsystem auf, die durch den Fahrer übersteuerbar ist, wie z. B. bei Adaptive Cruise Control (ACC), bei dem das Abbremsen des Fahrzeugs durch Betätigen des Gaspedals übersteuerbar ist. Bei einem agierenden System hat der Fahrer dagegen keinen Einfluss auf die Durchführung des Eingriffs, dies ist z. B. beim Antiblockiersystem (ABS) und dem Elektronischen Stabilitätsprogramm (ESP) der Fall.

Das Assistenzkonzept beschreibt die Interaktion des Fahrzeugs mit seiner Umwelt. Die Einteilung in die drei Kategorien fahrzeugautonom, infrastrukturbasiert und kooperativ wird u. a. von der OECD empfohlen.¹¹ Bei fahrzeugautonomen Systemen findet kein Informationsaustausch mit anderen Fahrzeugen oder Infrastruktursystemen statt. Alle relevanten Daten werden über die im Fahrzeug enthaltenen Fahrzeug- und Umfeldsensoren gewonnen, verarbeitet und dem Fahrer gegebenenfalls über eine geeignete Mensch-Maschine-Schnittstelle dargeboten. Bei infrastrukturbasierten Systemen befinden sich alle Elemente, wie z. B. Sensorik, außerhalb des Fahrzeugs. Informationen und Warnungen werden z. B. durch zentrale Dienste aufbereitet und über Wechselbeschilderungen an den Fahrer übermittelt. Bei kooperativen Systemen erfolgt ein Datenaustausch per Funkkommunikation, entweder nur zwischen Fahrzeugen oder zwischen Fahrzeugen und der sie umgebenden Infrastruktur. In Abhängigkeit von Art und Richtung des Datenflusses unterscheidet man Fahrzeug-Fahrzeug-, Fahrzeug-Infrastruktur- und Infrastruktur-Fahrzeug-Kommunikation.^{12,13}

Die Klassifizierung der Fahrerassistenzsysteme nach der Assistenzebene geht zurück auf die Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgaben nach Donges, siehe Abbildung 1. Die Aufgabe des Fahrers auf der Navigationsebene besteht in der Routenplanung zur Erreichung des gewünschten Ziels und der Routenanpassung als Reaktion auf die aktuelle Verkehrssituation. Auf der Bahnführungsebene setzt der Fahrer die geplante Route in Handlungen um, indem er Sollkurs sowie Sollgeschwindigkeit festlegt und Fahrmanöver wie z. B. einen Fahrstreifenwechsel ausführt. Ein sicherer und stabiler Fahrzustand wird auf der Stabilisierungsebene erreicht.

¹¹ Abele, J.; Kerlen, C.; Krüger, S. et al.: SEISS: Exploratory Study on the Potential Socio-economic Impact of the Introduction of Intelligent Safety Systems in Road Vehicles. Teltow, 2005, S. 33.

¹² Kleine, J.; Lotz, C.; Wiethoff, M. et al. (Hrsg.): IN-SAFETY: Policy Recommendations. Deliverable D5.4, 2008, S. 14.

¹³ Üblich sind die Abkürzungen der englischen Begriffe: C2C (car-to-car), C2I (car-to-infrastructure) und I2C (infrastructure-to-car).

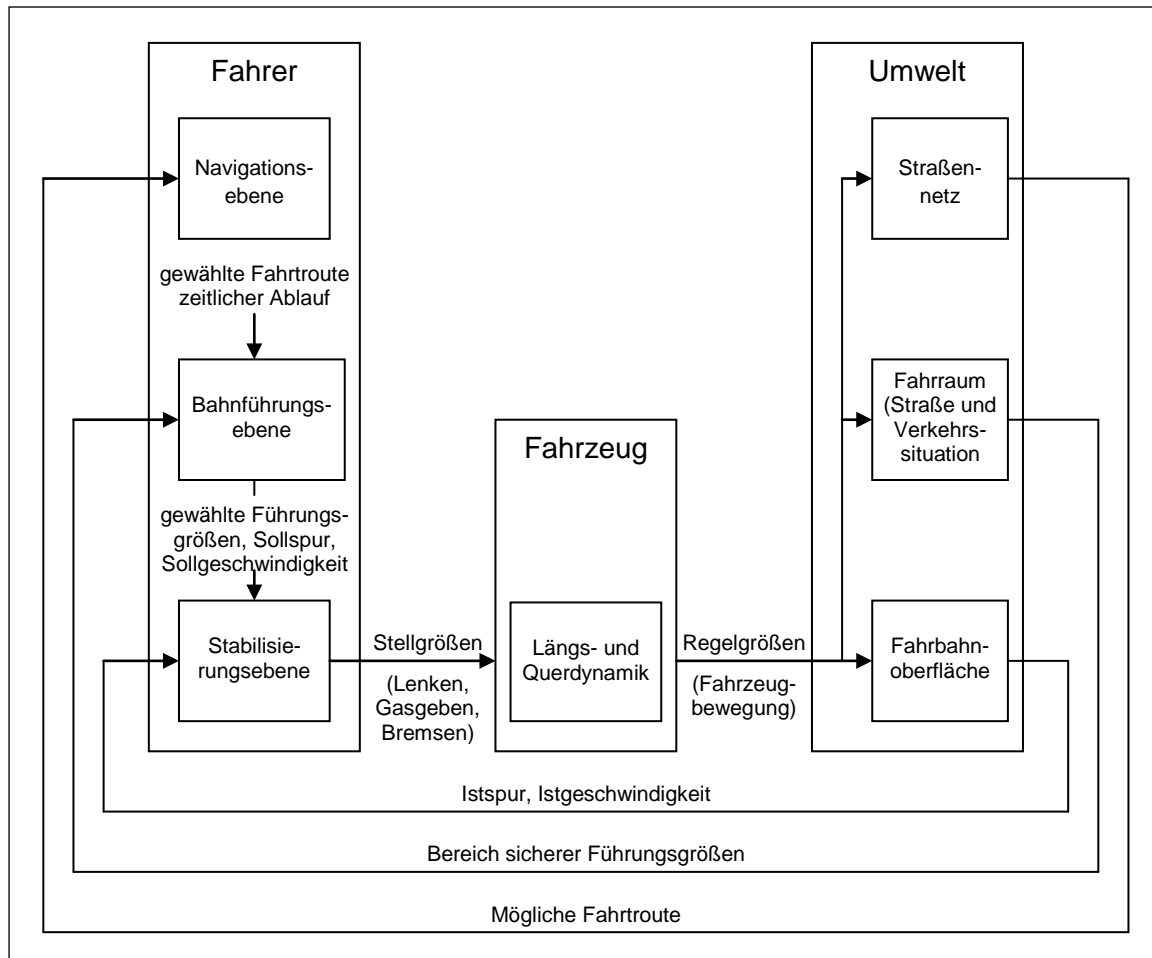


Abbildung 1: Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe¹⁴

Im Englischen existiert eine Reihe von Begriffen für Fahrerassistenzsysteme. Am weitesten gefasst ist der Überbegriff *Intelligent Transportation Systems and Services (ITSS)*, wozu jedes System zählt, das den Transport von Menschen und Gütern „intelligenter“ macht. Der Blick ist dabei nicht auf Fahrzeuge beschränkt, sondern auf die Verkehrsströme innerhalb eines (Teil-)Netzes. Die größte Übereinstimmung mit dem Begriff Fahrerassistenzsysteme besteht bei *Advanced Driver Assistance Systems (ADAS)*, wobei das *Advanced* als Abgrenzung zu einfachen Assistenzsystemen ohne Umfeldsensorik dient, wie z. B. der Blinkerhebelrückstellung. Weitgehend synonym verwendet werden *Automated Vehicle Guidance (AVG)* und *Advanced Vehicle Control and Systems (AVCSS)*. *Intelligent Vehicle Safety Systems (IVSS)* beziehen sich im Gegensatz zu ITSS ausschließlich auf Sicherheitssysteme und beinhalten sowohl Unfallvermeidung als auch Verletzungsprävention und Crash-Sicherheit.

¹⁴ Eigene Darstellung nach: Donges, E.: Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. In: Automobil-Industrie 2/82, 1982, S. 184.

Bewerten

Der Begriff „Bewerten“ wird in unterschiedlichen Zusammenhängen verwendet. Im Rahmen dieser Arbeit werden vergleichende Bewertungen und Einzelbewertungen unterschieden. Bei einer vergleichenden Bewertung werden mehrere Varianten einander gegenübergestellt, um sich Klarheit über die jeweiligen Vor- und Nachteile zu verschaffen und auf Basis zuvor definierter Entscheidungskriterien eine Auswahl treffen oder eine Rangfolge bilden zu können. Um diese vergleichende Bewertung durchführen zu können, müssen die zur Auswahl stehenden Alternativen zunächst einer Einzelbewertung unterzogen und anhand bestimmter Kriterien ihre Eigenschaften ermittelt werden.

Tunnel, Pluralbildung und Flexion

Grammatikalisch wird das Wort Tunnel im deutschen Sprachraum nicht einheitlich behandelt. In Deutschland ist es ganz überwiegend *der Túnnel*, auf der ersten Silbe betont, in der Schweiz dagegen *das Tunnél* mit Betonung der zweiten Silbe¹⁵, gelegentlich auch *Tunnell* geschrieben¹⁶. Bei Pluralbildung und Flexion gibt es ebenfalls zwei Varianten, wie die folgende Tabelle 4 zeigt:

Tabelle 4: Flexion von „Tunnel“ im Singular und Plural¹⁷

	Nominativ	Genitiv	Dativ	Akkusativ
Singular	der Tunnel	des Tunnels	dem Tunnel	den Tunnel
Plural 1	die Tunnel	der Tunnel	den Tunneln	die Tunnel
Plural 2	die Tunnels	der Tunnels	den Tunnels	die Tunnels

In der Literatur finden sich beide Pluralformen, ohne dass eine klare Mehrheit erkennbar wäre. Da jedoch laut Duden¹⁸ die Plural 2-Form weniger gebräuchlich ist, wird im Rahmen dieser Arbeit der Plural 1 verwendet.

¹⁵ Philosophisch-Historische Fakultät der Universität Augsburg: Atlas der Deutschen Alltagssprache. http://www.philhist.uni-augsburg.de/lehrstuehle/germanistik/sprachwissenschaft/ada/runde_4/f24a-g/, abgerufen am 20. März 2009.

¹⁶ Wiktionary: Das freie Wörterbuch. <http://de.wiktionary.org/wiki/Tunnel>, abgerufen am 20. März 2009.

¹⁷ Ebenda.

¹⁸ Duden: Deutsches Universalwörterbuch. 4. Auflage. Dudenverlag, Mannheim, 2001, S. 1615.

2. Ausgangslage

2.1. Entwicklung des Unfallgeschehens in der Europäischen Union

Der erste in den USA dokumentierte Verkehrsunfall, bei dem ein Mensch von einem Kraftwagen getötet wurde, stammt aus dem Jahr 1899 und wird wie folgt beschrieben:

*„On a September day in 1899, Mr. H. H. Bliss stepped down from a trolley car in New York City and, while graciously assisting a lady passenger to alight, was fatally struck by a horseless carriage.“*¹⁹

Ein Jahrhundert später, im Jahr 2000, ereigneten sich auf dem Gebiet der Europäischen Union (EU-15) etwa 1,3 Millionen Straßenverkehrsunfälle, in denen 40.000 Menschen getötet und 1,7 Millionen verletzt wurden. Verkehrsunfälle sind damit in der Gruppe der unter 45-Jährigen die häufigste Todesart, noch vor Herzerkrankungen und Krebs. Zwischen den einzelnen Mitgliedsstaaten bestehen dabei jedoch erhebliche Unterschiede, siehe Abbildung 2.

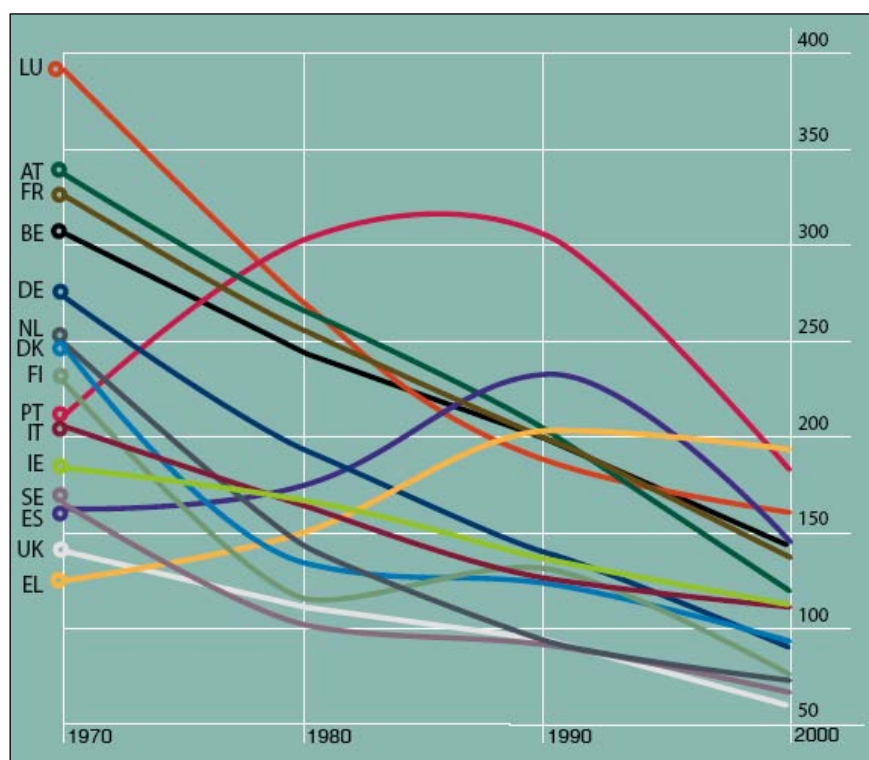


Abbildung 2: Zahl der in Straßenverkehrsunfällen Getöteten pro Million Einwohner und Jahr in den genannten Mitgliedsstaaten 1970-2000²⁰

¹⁹ Nader, R.: Unsafe at any speed. Grossmann, New York, 1965, S. 295. Nach: Gründl, M.: Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotential und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen. Dissertation, Universität Regensburg, 2005, S. 15.

²⁰ Kommission der Europäischen Gemeinschaft: Saving 20 000 lives on our roads. A shared responsibility. Brüssel, 2003, S. 7.

Diese Zahlen waren der Anlass für die Europäische Kommission im Jahr 2001 das Weißbuch *Die europäische Verkehrspolitik bis 2010 - Weichenstellungen für die Zukunft*²¹ zu verabschieden, in dem 60 Maßnahmen beschrieben werden, die zur einer signifikanten Verbesserung der Qualität und Effizienz des Verkehrs in Europa führen sollen. Ziel dieser Maßnahmen ist es, die Zahl der im Straßenverkehr Getöteten bis zum Jahr 2010 zu halbieren.²² Dieses Ziel wurde 2003 mit der Verabschiedung des Europäischen Aktionsprogramms für die Straßenverkehrssicherheit bekräftigt.²³ Teil dieses Aktionsprogramms ist das eSafety-Konzept, in dessen Rahmen die Initiative *Intelligentes Fahrzeug* gestartet wurde. Ziel ist es, intelligente Technologien für die Verbesserung der aktiven Sicherheit zu nutzen und damit die Erfolge der passiven Sicherheit zu ergänzen. Besonderes Augenmerk von Kommission, Mitgliedsstaaten und Industrie liegt dabei auf der Einführung eines automatischen Notrufsystems (eCall) sowie Systemen, die die Wechselwirkung von Fahrzeug und Infrastruktur betreffen.²⁴

Eine Zwischenbilanz des Vorhabens wurde Anfang 2006 gezogen. Im Jahr 2005 wurden noch 41.600 Getötete auf dem Gebiet der EU-25 registriert, siehe Abbildung 3.

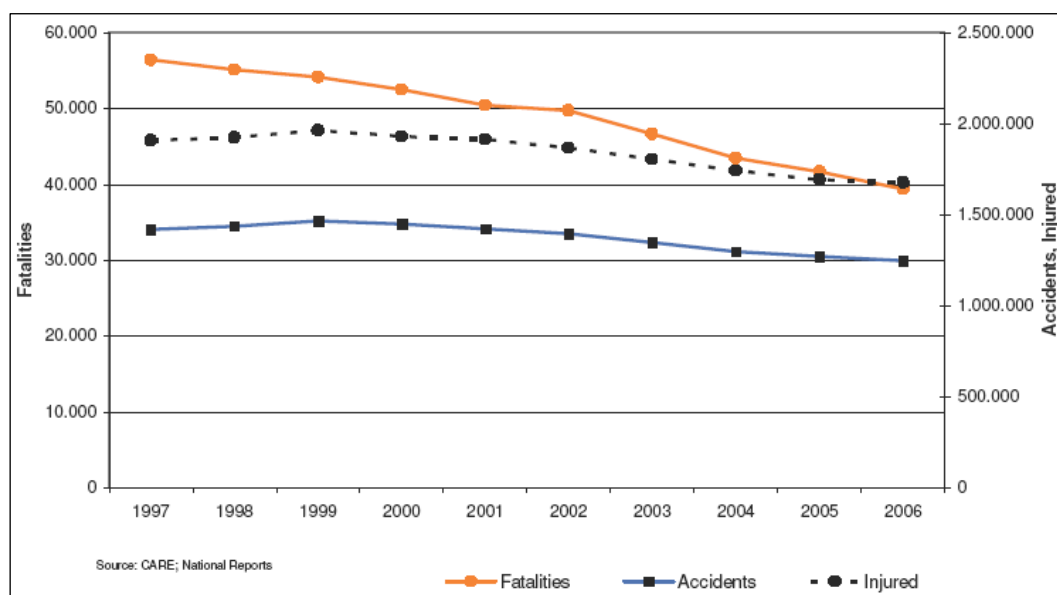


Abbildung 3: Zahl der Getöteten, Verletzten und Unfälle 1997-2006 (EU-25)²⁵

²¹ Kommission der Europäischen Gemeinschaft: Weißbuch: Die europäische Verkehrspolitik bis 2010 - Weichenstellungen für die Zukunft bzw. White Paper: European transport policy for 2010: time to decide. Brüssel, 2001.

²² Dies bedeutete zunächst (EU-15) eine Reduktion auf 20.000 Getötete pro Jahr. Nach der Erweiterung der Europäischen Union im Jahr 2004 erfolgte eine Aktualisierung: Das Ziel ist nun, eine Reduktion auf 25.000 Getötete pro Jahr zu erreichen. Siehe Kommission der Europäischen Gemeinschaft: Europäisches Aktionsprogramm für die Straßenverkehrssicherheit. Halbzeitbilanz. Brüssel, 2006, S. 2.

²³ Kommission der Europäischen Gemeinschaft: Halbierung der Zahl der Unfallopfer im Straßenverkehr in der Europäischen Union bis 2010: eine gemeinsame Aufgabe bzw. Saving 20.000 lives on our roads. A shared responsibility. Brüssel, 2003.

²⁴ Kommission der Europäischen Gemeinschaft: Europäisches Aktionsprogramm für die Straßenverkehrssicherheit. Halbzeitbilanz. Brüssel, 2006, S. 6.

²⁵ European Road Safety Observatory: Annual Statistical Report 2008 Based on Data from CARE/EC, S. 7.

Zwischen 2001 und 2005 konnte zwar insgesamt eine Verringerung der Zahl der Getöteten um 17,5 % erreicht werden, doch bei gleichbleibender Abnahme würden im Jahr 2010 immer noch 32.500 Menschen bei Verkehrsunfällen ums Leben kommen, und das Ziel der Reduktion auf 25.000 demnach verfehlt.

Die Analyse der Unfalldaten zeigt, dass sich die schwersten Unfälle außerorts (ohne Autobahnen) ereignen. Ihr Anteil an allen Unfällen beträgt 28 %, gleichzeitig entfallen jedoch 60 % aller Getöteten auf Unfälle außerorts. Im Gegensatz dazu beträgt der Anteil der Unfälle innerorts 67 % bei einem Anteil von 31 % der Getöteten. Autobahnen sind in dieser Hinsicht die sichersten Straßen, da dort nur 5 % der Unfälle mit 9 % der Getöteten passieren. Zwischen den Staaten der EU-25 gibt es allerdings große Unterschiede, die deutlich werden, wenn man die Zahl der Getöteten pro Jahr ins Verhältnis zur Einwohnerzahl setzt. Diese Rate beträgt im Durchschnitt 95 Getötete pro Million Einwohner, in einigen Ländern jedoch nur 50-60 (Malta, Niederlande, Schweden, Vereinigtes Königreich) oder aber über 200 (Lettland und Litauen).²⁶

Insgesamt sind im Bereich der Straßenverkehrssicherheit seit 2001 schnellere Fortschritte erzielt worden als in den Jahren zuvor. Allerdings sind sie uneinheitlich und bislang unzureichend, um das Ziel der Halbierung der Zahl der Getöteten bis zum Jahr 2010 tatsächlich zu erreichen.

2.2. Besondere Gefahren von Tunnelunfällen

Es gibt mehrere Gründe, warum das Fahren in Straßentunneln im Allgemeinen risikoreicher ist als auf einer freien Strecke. Dies gilt sowohl für das Auftreten von Verkehrsunfällen als auch für die sich aus diesen Ereignissen ergebenden Konsequenzen. In diesem Abschnitt wird erläutert, worin die besonderen Gefahren von Tunnelunfällen bestehen. Eine ausführliche Analyse des Unfallgeschehens folgt in Kapitel 3.

2.2.1. Geringe Risikotoleranz

Tunnel zählen wie z. B. auch Brücken zu den sog. Erschwernisstrecken²⁷, deren Nutzung höhere Anforderungen an einen Fahrer stellt als eine durchschnittliche, gut ausgebaute Strecke im Freiland. Dies wird durch die baulichen Besonderheiten der Tunnelumgebung verursacht, ganz direkt z. B. dadurch, dass es in Tunneln keine Pannestreifen gibt. Eine Kursabweichung zur rechten Seite hin, die aus Unachtsamkeit oder in Folge überhöhter Geschwindigkeit geschieht, kann im Tunnel schnell schwerwiegendere Folgen haben als auf freier Strecke, da es durch den Mangel an Ausweichraum zu einer Kollision mit dem Bankett²⁸ kommt. Bleibt das Fahrzeug nach einer solchen Kollision liegen, stellt es eine Gefahr für den nachfolgenden Verkehr dar, da auch dieser wenig Raum für Ausweichmanöver zur Verfügung hat. Die Toleranz gegenüber Fehlern, sei es durch mangelnde Präzi-

²⁶ Kommission der Europäischen Gemeinschaft: Europäisches Aktionsprogramm für die Straßenverkehrssicherheit. Halbzeitbilanz. Brüssel, 2006, S. 4.

²⁷ Grupp, K.; Blümel, W. (Hrsg.): Finanzierung des Fernstraßenbaus. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Heft S 50. Bergisch-Gladbach, 2007, S. 51.

²⁸ Der erhöhte, nicht befahrbare Seitenstreifen wird als Bankett bezeichnet.

sion bei der Kurshaltung oder andere Gründe, ist im Tunnel aufgrund des eingeschränkten Raums demnach geringer als auf freier Strecke.²⁹ Dies gilt insbesondere für Tunnel mit Gegenverkehr, in denen die Fehlertoleranz im Vergleich zu Tunnel mit Richtungsverkehr noch geringer ist. Fehlverhalten oder das Ausweichen vor einem Hindernis kann hier zu einer Frontalkollision mit dem Gegenverkehr führen.³⁰

2.2.2. Rettungswege

Neben dem Ausweichraum sind im Tunnel auch die Rettungswege im Vergleich zur offenen Umgebung eingeschränkt. Wenn ein Unfall oder sonstiger Vorfall es erforderlich machen, dass die Fahrzeuginsassen ihre Fahrzeuge und den Tunnel verlassen, so müssen sie vorher definierten Rettungswegen folgen. Dies setzt voraus, dass diese Wege gefunden und befolgt werden. Verschiedene Untersuchungen^{31,32,33} kamen zu dem Ergebnis, dass viele Autofahrer nicht wissen, wie sie sich im bei einem Notfall im Tunnel verhalten sollen und dass die Bereitschaft, das eigene Fahrzeug zurückzulassen, gering ist. Dies kann wie im Falle des Mont Blanc-Unfalls dazu führen, dass Menschen in ihren Fahrzeugen zu Tode kommen, weil sie nicht rechtzeitig flüchten.³⁴

Neben der Selbstrettung besteht der zweite wichtige Teil der Rettung darin, dass Einsatzkräfte zum Unglücksort vordringen können. Auch hier sind die Zugangsmöglichkeiten in einem Tunnel im Vergleich zur freien Strecke eingeschränkt, was die Gefährlichkeit eines Vorfalls erhöht.³⁵

2.2.3. Feuer

Vorfälle sind in einem Tunnel dann besonders kritisch, wenn aufgrund eines Unfalls oder technischen Defekts ein Brand entsteht. Ein Feuer in einem solchen beschränkt zugänglichen Raum erhöht die Gefahr für alle Beteiligten erheblich, da es u. U. Rettungswege versperrt und aufgrund der Rauch- und Hitzeentwicklung sowohl Selbstrettung als auch Rettung durch Einsatzkräfte erschwert wird.³⁶ Gerade die schnelle Selbstrettung ist aber von außerordentlicher Wichtigkeit, da es bereits wenige Minuten nach Ausbruch eines

²⁹ Salvisberg, U.; Allenbach, R.; Cavegn, M. et al.: Verkehrssicherheit in Autobahn- und Autostrassentunneln des Nationalstrassennetzes - bfu-Report Nr. 51/2004. Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung (bfu), Bern, 2004, S. 61.

³⁰ Salvisberg, a. a. O., S. 63-64.

³¹ Voeltzel, A.; Dix, A.: A Comparative Analysis of the Mont Blanc, Tauern and Gotthard Tunnel Fires. In: Routes/Roads Nr. 324, World Road Association, 2004, S. 18-34.

³² Ricard, F.: Résultats du projet ACTEURS sur le comportement des usagers en tunnel. 33. ASEACAP Study and Information Days, 22.-25. Mai 2005 in Wien. Siehe auch Kapitel 2.3.4.1.

³³ Tesson, M.; Lingelser, S.: Contributions from the Feedback on Experience to Improve Safety in Road Tunnels. 2. Internationaler Fachkongress Verkehr und Sicherheit in Straßentunneln, 19.-21. Mai 2003 in Hamburg.

³⁴ Voeltzel, A.; Dix, A., a. a. O., S. 30.

³⁵ Goncalves, N.; Guarascio, M.; Hall, R. et al.: Risk Analysis for Road Tunnels - PIARC Report 2008R02. PIARC Technical Committee Road Tunnel Operation (C3.3), Défense Cedex, 2008, S. 201.

³⁶ National Cooperative Highway Research Program: Making Transportation Tunnels Safe and Secure - NCHRP-Report 525. Washington, 2006, S. 46.

Feuers durch Rauch- und Hitzeentwicklung zu spät sein kann. Für den Brandfall ist es daher von großer Bedeutung, Tunnelnutzer über das richtige Verhalten zu informieren sowie Überwachungspersonal und Einsatzkräfte entsprechend zu schulen. Darüber hinaus hat die Ventilation des Tunnels bei Ausbruch eines Feuers maßgeblichen Einfluss auf den weiteren Ablauf.³⁷

2.3. Stand der Forschung Tunnelsicherheit

Schwere Unfälle im Tauern- und Mont Blanc-Tunnel im Jahr 1999 sowie Brände in einigen Eisenbahntunneln waren der Auslöser für zahlreiche Forschungsprojekte zur Erhöhung der Verkehrssicherheit von Tunneln. Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über die wichtigsten Projekte und ihre Ergebnisse.

2.3.1. UNECE: Ad hoc-Arbeitsgruppe Tunnelsicherheit

Im Jahr 2000 wurde innerhalb der United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) eine Ad hoc-Arbeitsgruppe multidisziplinärer Experten für Tunnelsicherheit gegründet. Diese Arbeitsgruppe hatte zum Ziel, mit Unterstützung der Europäischen Kommission und unter der Schirmherrschaft des Inland Transport Committee (ITC) der UNECE³⁸ Empfehlungen für die Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln aller Arten und Längen zu erarbeiten. Die UNECE kann rechtlich bindende Vorschriften erlassen, deren bekannteste im Verkehrsbereich wohl das Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr von 1968 ist.³⁹

Im Abschlussbericht der Expertenkommission vom Dezember 2001 wird festgehalten, dass das primäre Ziel der Bemühungen die Vermeidung von Vorfällen ist und dies Vorrang vor Maßnahmen zur Folgenminderung hat. Die vorbeugenden Strategien beziehen sich auf alle Ereignisse, die Menschenleben, Umwelt oder den Tunnel beschädigen können, darunter Unfälle und Feuer. Zur Erreichung beider Ziele, sowohl der Vermeidung als auch der Folgenminderung, wurden Maßnahmen definiert, die sich an eine der vier relevanten Gruppen richten: Tunnelbetrieb, Infrastruktur, Straßennutzer und Fahrzeuge.

Die Fahrzeuge als Element des Gesamtsystems Straßentunnel werden zwar mit sechs Maßnahmen adressiert, doch diese beschränken sich auf betriebliche Vorschriften:⁴⁰

- 4.01: In allen Lkw und Bussen sollte die Pflicht zur Mitführung von Feuerlöschern bestehen.

³⁷ Voeltzel, A.; Dix, A.: A Comparative Analysis of the Mont Blanc, Tauern and Gotthard Tunnel Fires. In: Routes/Roads Nr. 324, World Road Association, 2004, S. 34.

³⁸ Die UNECE ist eine der fünf Regionalkommissionen der Vereinten Nationen. Zum ihrem Bereich zählen insgesamt 56 Staaten, darunter alle EU-Staaten, alle sonstigen Staaten West-, Ost- und Südeuropas sowie der Commonwealth of Independent States (CIS) und Nordamerika. <http://www.unece.org/about/about.htm>, abgerufen am 6. März 2009.

³⁹ United Nations Economic Commission for Europe, Inland Transport Committee: Convention on Road Traffic. Wien, 1968.

⁴⁰ United Nations Economic Commission for Europe, Inland Transport Committee: Recommendations of the Group of Experts on Safety in Road Tunnels - UNECE-Report TRANS/AC.7/9. 2001, S. 42-43. (Eigene Übersetzung.)

- 4.02: Die von Lkw (keine Gefahrguttransporte) und Bussen mitgeführte Menge an Treibstoff sollte verringert werden.
- 4.03: Eine Studie über die Mindestanforderungen an die Feuerfestigkeit von Treibstofftanks von Lkw und Bussen sollte durchgeführt werden.
- 4.04: Abmessungen und zulässiges Gesamtgewicht von Lkw sollten nicht weiter erhöht werden, um die kalorische Brandlast, die ein Lkw darstellt, nicht zu erhöhen.
- 4.05: Eine Studie zum Einsatz hoch schwerentzündlicher Materialien in Fahrzeugen sollte initiiert werden.
- 4.06: Alle Lkw und Busse sollten jährlich technisch überprüft werden, wie von der UNECE-Übereinkunft vom 13. November 1997⁴¹ oder der EU-Richtlinie 96/96/EC⁴² gefordert, insbesondere was die Aspekte zum Feuerschutz betrifft.

Über diese Maßnahmen hinaus wird im Abschlussbericht der Expertengruppe erläutert, dass heutige Fahrzeuge durch den technischen Fortschritt der letzten Jahre ein Sicherheitsniveau erreicht haben, das höher ist als jemals zuvor. Dies bezieht sich jedoch auf Aspekte wie die reduzierte Gefahr eines Feuersausbruchs infolge eines Unfalls, was durch verändertes Design und Platzierung der Treibstofftanks erreicht werden konnte oder die verringerte Gefahr von Bränden durch mechanische oder elektrische Defekte. Als Nachteil dieser größeren Zuverlässigkeit der Fahrzeuge wird angeführt, dass viele Fahrer nun ein trügerisches Gefühl erhöhter Sicherheit haben und sich mit ihren Fahrzeugen öfter im fahrdynamischen Grenzbereich befinden als dies früher der Fall war und sie dabei z. B. die Gefahren zu schneller Kurvenfahrt unterschätzen.⁴³ Dennoch findet sich im Abschlussbericht der Kommission und insbesondere im Kapitel zu den fahrzeugbezogenen Maßnahmen kein Hinweis auf Systeme der aktiven Sicherheit und ihren möglichen Beitrag zur Erhöhung der Verkehrssicherheit.⁴⁴

Innerhalb der Europäischen Union bildeten die Empfehlungen der Kommission die Basis für die Entwicklung einer Richtlinie über die Mindestsicherheitsausstattung von Straßentunneln, die 2004 erlassen wurde.^{45,46} Sie gaben außerdem den Anstoß, innerhalb des fünften und sechsten Rahmenprogramms der EU mehrere Projekte zum Thema Tunnelsicherheit durchzuführen, die in den folgenden Kapiteln erläutert werden.

⁴¹ United Nations Economic Commission for Europe, Inland Transport Committee: Agreement Concerning the Adoption of Uniform Conditions for Periodical Technical Inspections of Wheeled Vehicles and the Reciprocal Recognition of Such Inspections. Wien, 1997.

⁴² N. N.: Richtlinie 96/96/EC des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die technische Überwachung der Kraftfahrzeuge und Kraftfahrzeuganhänger. In: Amtsblatt der Europäischen Union vom 20. Dezember 1996.

⁴³ United Nations Economic Commission for Europe, Inland Transport Committee: Recommendations of the Group of Experts on Safety in Road Tunnels - UNECE-Report TRANS/AC.7/9. 2001, S. 39.

⁴⁴ ABS wurde von Bosch bereits 1978 in den Markt eingeführt, ESP 1995 und ACC 1998. Zumindest ABS und ESP hätten also Erwähnung finden können. Vgl. Robert Bosch GmbH: Aktive Sicherheitssysteme helfen Unfälle zu vermeiden. <http://rb-k.bosch.de>, abgerufen am 28. Mai 2010.

⁴⁵ Pesut, A.; Smith, C.: Activities of the United Nations Economic Commission for Europe to Promote Safety in Tunnels. In: Routes/Roads Nr. 324, World Road Association, 2004, S. 85.

⁴⁶ Siehe Kapitel 2.4.1.

2.3.2. Projekte innerhalb des 5. EU-Rahmenprogramms

2.3.2.1. FIT – Fire in Tunnels

FIT, *Fire in Tunnels*, startete im März 2001 und war in Form eines „Thematic Network“ organisiert, in dem 33 Partner aus 12 europäischen Staaten beteiligt waren. Das Ziel bestand darin, den Stand der Technik im Hinblick auf den feuersicheren Bau und Betrieb von Tunneln zu ermitteln und die jeweiligen Erfahrungen der Partnerstaaten in Form von Datenbanken allgemein verfügbar zu machen. Die insgesamt sechs Datenbanken⁴⁷ enthalten Informationen zu Forschungsprojekten, Versuchsanlagen, numerischen Simulationsmodellen, Analysen von Brandunfällen und Möglichkeiten zur Nachrüstung von Tunneln. Die im Rahmen dieses Projekts erarbeitete Datengrundlage diente zur Formulierung von Sicherheitsrichtlinien zum Feuerschutz von Tunneln.⁴⁸

2.3.2.2. DARTS – Durable and Reliable Tunnel Structures

DARTS, *Durable and Reliable Tunnel Structures*, wurde ebenfalls im März 2001 ins Leben gerufen, hatte aber im Gegensatz zu FIT den Tunnel als Bauwerk zum Gegenstand. Die acht Projektpartner entwickelten Methoden und Unterstützungskonzepte für die optimale Auswahl von Tunneltyp und -bauweise. Mit den entwickelten Werkzeugen soll es möglich sein, in Abstimmung auf die jeweiligen Projektgegebenheiten eine möglichst hohe Lebensdauer und verbesserte Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken zu erreichen. Der Fokus liegt dabei auf neuen Tunneln, doch auch für die Aufrüstung bestehender Tunnel wurden Methoden entwickelt.⁴⁹

2.3.2.3. Safe Tunnel – Innovative Systems and Frameworks for Enhancing of Traffic Safety in Road Tunnels

Das Projekt Safe Tunnel, *Innovative Systems and Frameworks for Enhancing of Traffic Safety in Road Tunnels*, wurde von 2001 bis 2004 unter der Leitung des Centro Recherche Fiat bearbeitet. Beteiligt waren neben Automobilherstellern und Telekommunikationsunternehmen, die TÜV Kraftfahrt GmbH sowie die beiden Betreibergesellschaften des Fréjus-Tunnels (SFTRF, *Société française du tunnel routier du Fréjus* und SITAF, *Società Italiana Traforo Autostradale del Frejus*). Ziel dieses Projekts war es, die Zahl der Unfälle in Straßentunneln durch präventive Sicherheitsmaßnahmen zu reduzieren. Der Schwerpunkt lag dabei auf Unfällen mit Beteiligung von Lkw, in deren Verlauf es zum Ausbruch eines Feuers kommt. Diese Art Ereignis ist zwar selten, stellt aber eines der

⁴⁷ FIT: Fire in Tunnels. <http://www.etnfit.net/>, abgerufen am 18. November 2008.

⁴⁸ Khoury, G. A.: EU Tunnel Fire Safety Action. In: Tunnels and Tunnelling International April 2003. British Tunnelling Society, London, 2003, S. 22 und www.etnfit.net, abgerufen am 24. August 2008.

⁴⁹ Siehe Khoury, G. A., a. a. O., S. 22; und DARTS: Durable and Reliable Tunnel Structures. http://cordis.europa.eu/data/PROJ_FP5/ACTIONeqDndSESSIONeq112242005919ndDOCEq696ndTBLeqEN_PROJ.htm, abgerufen am 24. August 2008. Die Website des Projekts, www.dartsproject.net, ist nicht mehr verfügbar.

gefährlichsten Risiken in einem Straßentunnel dar.⁵⁰ Darüber hinaus wurde das Ziel verfolgt, die Machbarkeit innovativer Anwendungen für die Unfallvermeidung in Straßentunneln nachzuweisen, die auf einer Kooperation intelligenter Infrastruktur mit intelligenten Fahrzeugen basieren. Zu diesem Zweck wurden die vier unterschiedlichen Anwendungen entwickelt.⁵¹

1. Fahrzeugzustandserkennung und Zugangskontrolle
2. Vehicle Telecontrol – Fernsteuerung von Geschwindigkeit und Abstand durch ein fahrzeugbasiertes System,
3. Bereitstellung von Notfallinformationen im Fahrzeug und
4. Moving Spotlight System – Abstandskontrolle durch ein infrastrukturbasiertes System.⁵²

Umsetzung und Test der Systeme erfolgte im Fréjus-Tunnel, in dem zur Steuerung der Anwendungen die Leitzentrale erweitert wurde.⁵³

2.3.2.4. SIRTAKI – Safety Improvement in Road and Rail Tunnels Using Advanced Information Technologies and Knowledge Intensive Decision Support Models

Auch SIRTAKI, *Safety Improvement in Road and Rail Tunnels Using Advanced Information Technologies and Knowledge Intensive Decision Support Models*, startete im September 2001. Ein Konsortium aus zwölf europäischen Partnern befasste sich mit der Entwicklung fortschrittlicher Tunnelmanagementsysteme, die bei voller Integration in das bereits vorhandene Verkehrsnetzmanagement eine bessere Unterstützung bei Sicherheits- und Notfallfragen geben sollen. Vier Aspekte des Tunnelmanagements stehen dabei im Mittelpunkt: die Vermeidung von Konflikten und Notfällen, die bessere Unterstützung der Tunnelmanager, ein integriertes Management des Tunnels als Teil des umgebenden Verkehrsnetzes und die Verbesserung der Tunnelüberwachung.⁵⁴

2.3.2.5. Virtual Fires – Virtual Real Time Emergency Simulator

Im November 2001 begann ein Team aus acht Partnern aus fünf europäischen Staaten mit der Entwicklung eines Simulators für die Brandausbreitung und Brandbekämpfung in

⁵⁰ Centro Ricerche Fiat: Safe Tunnel: Innovative Systems and Frameworks for Enhancing of Traffic Safety in Road Tunnels. <http://www.crfproject-eu.org>, abgerufen am 3. März 2009.

⁵¹ Sala, G.; Carrubba, E.; Jallasse, U. et al.: Improvement of Accident Prevention in Road Tunnels Through Intelligent Infrastructures and Intelligent Vehicles Cooperation. 10th World Congress on ITS, 16.-20. November 2003 in Madrid, S. 1.

⁵² Die Bezeichnungen der vier Anwendungen weichen in unterschiedlichen Publikationen voneinander ab, vgl. z. B. Brignolo, R.; Savio, W.: The Safe Tunnel System. 12th International Symposium ATA EL, 16.-18. Juni 2004 in Parma. Darin: On Board Fahrzeugzustandserkennung, Zugangskontrolle, Geschwindigkeits- und Abstands-Telecontrol, Verbreitung von Notfallinformationen.

⁵³ Sala, G.: The Control Center. Abschlusspräsentation der europäischen Projekte Safe Tunnel und SIRTAKI im Rahmen des Forums Safety in Road and Rail Tunnels, 20.-21. Dezember 2004 in Turin.

⁵⁴ Khoury, G. A.: EU Tunnel Fire Safety Action. In: Tunnels and Tunnelling International April 2003. British Tunnelling Society, London, 2003, S. 22 und www.sirtakiproject.com, abgerufen am 24. August 2008.

Tunneln. In der virtuellen Tunnelumgebung kann zum einen die Feuersicherheit eines Bauwerks, zum anderen der Einfluss von Brandschutzsystemen (z. B. der Ventilation) untersucht werden. Darüber hinaus kann der Simulator zur Ausbildung von Feuerwehren genutzt werden und eine Alternative zu aufwändigen Übungen in echten Tunnel mit kontrollierten Feuern sein.⁵⁵

2.3.2.6. UPTUN – Upgrading Existing Tunnels

Projekthalt von UPTUN, *Upgrading Existing Tunnels*, das im September 2002 begann, ist die Entwicklung von kostengünstigen, nachhaltigen und innovativen Verfahren, mit denen die Feuersicherheit von bereits bestehenden Tunneln erhöht werden kann. UPTUN war das umfangreichste der Tunnelprojekte im 5. Rahmenprogramm und wurden von 41 Partnern aus 13 EU-Mitgliedsstaaten sowie drei weiteren Staaten bearbeitet. Im Rahmen dieses Projekts wurden zum einen Maßnahmen erarbeitet, mit denen der Ausbruch eines Feuers im Tunnel verhindert oder die Konsequenzen eines solchen Brandes reduziert werden können. Die Maßnahmen bezogen sich dabei auf die Verbesserung von Prävention, Feuerdetektion, Tunnelüberwachung und Folgenminderung. Zum anderen wurde eine Methode entwickelt, mit der der Sicherheitszustand von Tunneln in Bezug auf Feuer und die Wirkung möglicher Verbesserungsmaßnahmen untersucht werden kann.⁵⁶

2.3.2.7. SafeT – Safety in Tunnels und Global Approach to Safety

SafeT, *Safety in Tunnels*, das im April 2003 begann, ist ebenso wie FIT, *Fire in Tunnels*, als „Thematic Network“ organisiert. Ziel des Vorhabens ist die Harmonisierung der europäischen Vorschriften und Regelungen zur Sicherheit von Tunneln und ihre Überarbeitung auf Basis der Forschungsergebnisse, die in den zuvor genannten Projekten erzielt wurden. Der Schwerpunkt liegt dabei auf präventiven Sicherheitsmaßnahmen, dem Tunnelmanagement und dabei insbesondere auf Fragestellungen, die grenzüberschreitende Tunnel betreffen.⁵⁷ Ergebnis des Projekts sind europäische best practice-Richtlinien für die Tunnelsicherheit.

Aus dem Projekt SafeT ging als weiteres Vorhaben die Entwicklung einer *Global Approach to Tunnel Safety* hervor. Auf die Erkenntnisse aus diesen Arbeiten sowie dem Projekt UPTUN wiederum baut eine Studie der World Road Association PIARC auf. Aufgrund des engen Zusammenhangs werden sowohl die Entwicklung der *Global Approach* als auch die Ergebnisse der PIARC-Studie im Folgenden dargestellt, obwohl sie nicht Teil des 5. EU-Rahmenprogramms waren.

⁵⁵ Siehe Khoury, G. A.: EU Tunnel Fire Safety Action. In: Tunnels and Tunnelling International April 2003. British Tunnelling Society, London, 2003, S. 22; und Virtual Fires: Virtual Real Time Emergency Simulator. www.ist-world.org/ProjectDetails.aspx?ProjectId=01af430cfd9e4abdb92068afe5439bbb, abgerufen am 24. August 2008. Die Website des Projekts, www.virtualfires.org, ist nicht mehr verfügbar.

⁵⁶ Siehe Khoury, G. A., a. a. O., S. 22; und UPTUN: Upgrading Existing Tunnels. www.uptun.net, abgerufen am 24. August 2008.

⁵⁷ Siehe Khoury, G. A., a. a. O., S. 22; und SafeT: Safety in Tunnels. www.safetunnel.net, abgerufen am 24. August 2008.

2.3.2.8. Global Approach to Tunnel Safety

Die beiden Projekte SafeT und UPTUN beschäftigen sich aus unterschiedlichen Blickwinkeln mit dem Thema Tunnelsicherheit. Während bei SafeT die Vorbeugung und Vermeidung von Unfällen im Fokus steht, sind bei UPTUN Maßnahmen zur Folgenminderung Gegenstand der Forschung. Beide Projekte ergänzen sich und innerhalb von SafeT wurde daher in Zusammenarbeit mit den Bearbeitern von UPTUN eine sog. *Global Approach to Tunnel Safety* entwickelt. Die Basis dieser Methode bilden Arbeiten von Prof. G. Khoury, der sich bereits zuvor mit einem risikobasierten Ansatz zur Tunnelsicherheit auseinandergesetzt hatte⁵⁸ und Scientific Manager sowohl bei SafeT als auch UPTUN war. Für die Erarbeitung der *Global Approach* wurden international verbreitete Ansätze zur Erhöhung der Tunnelsicherheit analysiert und die Projektergebnisse von SafeT und anderen Projekten eingearbeitet. Hauptkritikpunkt an bestehenden Methoden ist, dass sie sich alle auf Teilbereiche des Problems konzentrierten, aber kein integrierter und gleichzeitig flexibler Ansatz existiere, der weltweit zur Anwendung kommen könne.⁵⁹ Der Ansatz von Khoury et al. umfasst daher alle Aspekte eines Tunnels, die Einfluss auf die Sicherheit haben, von der Planung einer neuen Anlage über den Betrieb eines bestehenden Tunnels bis hin zur Rettung der Betroffenen nach einem Unfall und der allgemeinen Folgenminderung. Berücksichtigt werden alle Gruppen, die mit den Tunneln in Verbindung stehen, wobei besonders betont wird, dass die Autofahrer ein schwaches Element des Systems sind, da häufig Unkenntnis über das richtige Verhalten im Tunnel besteht. Dennoch sind Fahrzeuge als Systemelemente bzw. die in Fahrzeugen vorhandenen Systeme zur Unfallvermeidung und Folgenminderung nicht Teil der *Global Approach*.⁶⁰

2.3.2.9. PIARC Integrated Approach to Tunnel Safety

Die bislang dargestellten Forschungsvorhaben haben mehrheitlich die schnelle Erkennung und wirksame Bekämpfung von Bränden im Tunnel zum Thema. Zum selben Ergebnis kommt eine vom Technical Committee C3.3, *Road Tunnel Operation*, der World Road Association PIARC durchgeführte Studie aus dem Jahr 2007, in der die Ergebnisse internationaler Forschungsvorhaben zusammengefasst und durch eine weltweite Umfrage nach best practice-Methoden zur Gewährleistung der Sicherheit in Straßentunnel ergänzt werden.⁶¹ Auf Basis dieser Ergebnisse kommt die PIARC zu dem Schluss, dass ein integrierter, risikobasierter Ansatz für die Tunnelsicherheit erforderlich ist, der alle Phasen des Sicherheitskreislaufs (Safety Circle) berücksichtigt.⁶² Der Ansatz der PIARC wurde in Kooperation mit den Projekten SafeT und UPTUN bzw. der sog. *Global Approach*, die

⁵⁸ Khoury, G. A.: Actual Time Tunnel Safety - A New Approach. In: Tunnels and Tunnelling International Juli 2005. British Tunnelling Society, London, 2005. S. 46-48.

⁵⁹ Khoury, G. A.; Horn, B. v. d.; Molag, M. et al.: SafeT Work Package 7 - Harmonised European Guidelines for Tunnel Safety - WP7.1. Global Approach to Tunnel Safety. 2006, S. 40: „What is lacking is a global, holistic, integrated and flexible approach that can be adopted world-wide.“

⁶⁰ Khoury, G. A.; Horn, B. v. d.; Molag, M. et al., a. a. O., S. 41-42.

⁶¹ Sajtar, L.; Walet, F.; Wielinga, L.: Integrated Approach to Road Tunnel Safety - PIARC Report 2007R07. PIARC Technical Committee Road Tunnel Operation (C3.3), La Défense Cedex, 2007. Projekte: S. 77-95, Ergebnisse der Umfrage: S. 95-169.

⁶² Sajtar, L.; Walet, F.; Wielinga, L., a. a. O., S. 35, Abbildung 2.

aus diesen Projekten entstand, erarbeiten. Im Gegensatz zur *Global Approach* ist der Ansatz der PIARC allerdings nicht als weltweit einheitliches Vorgehen gedacht und wird daher auch nicht als *Global Approach*, sondern als *Integrated Approach* bezeichnet.^{63,64}

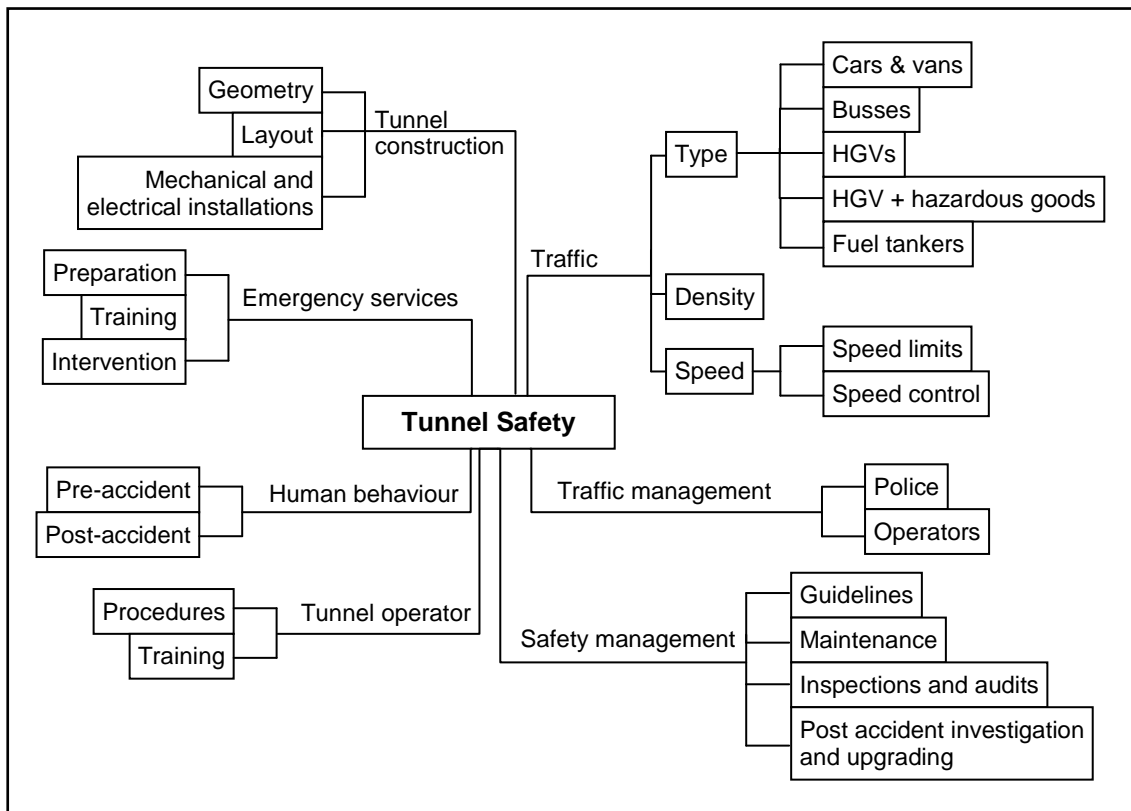


Abbildung 4: Elemente der Tunnelsicherheit⁶⁵

Der sog. Sicherheitskreislauf besteht aus sieben Phasen. Die beiden Phasen *Pro-action* und *Prevention* zählen darin zu den präventiven Abschnitten, die eine Vermeidung gefährlicher Situationen zum Ziel haben. *Pro-action* beinhaltet Maßnahmen, die weit im Vorfeld eines möglichen Unfalls ergriffen werden, wie z. B. die sicherheitsgerechte bauliche Gestaltung von Tunneln oder die Information und Verkehrserziehung von Autofahrern über das richtige Verhalten im Tunnel. Der Abschnitt *Prevention* befasst sich dagegen mit konkreten Maßnahmen im Tunnel bzw. seinem betrieblichen Ablauf, die dafür sorgen sollen, die Unfallwahrscheinlichkeit möglichst weit zu verringern.

Preparation umfasst zwar ebenfalls Maßnahmen, die vor einem Unfall geplant werden, die jedoch erst nach einem Vorfall ausgeführt werden, z. B. Notfalltrainings und Einsatz-

⁶³ Sajtar, L.; Walet, F.; Wielinga, L.: Integrated Approach to Road Tunnel Safety - PIARC Report 2007R07. PIARC Technical Committee Road Tunnel Operation (C3.3), La Défense Cedex, 2007, S. 23-25.

⁶⁴ Khoury, G. A.; Horn, B. v. d.; Molag, M. et al.: SafeT Work Package 7 - Harmonised European Guidelines for Tunnel Safety - WP7.1. Global Approach to Tunnel Safety. 2006, S. 42: „In PIARC, the need for a unified framework for tunnel safety is also recognised. A PIARC document on the subject will be published in 2007, and owing to mutual co-operation, both SafeT/UPTUN and PIARC will be in full agreement on the Global Approach.”

⁶⁵ Sajtar, L.; Walet, F.; Wielinga, L., a. a. O., S. 33.

pläne.⁶⁶ Innerhalb dieser unterschiedlichen Phasen müssen alle Elemente des Systems „Straßentunnel“, die Abbildung 4 zeigt, berücksichtigt werden.

Fahrzeuge bilden in diesem System ein Unterelement des Astes „Traffic“, der darüber hinaus die Aspekte Verkehrsdichte und Geschwindigkeit enthält. Forschungsprojekte oder Sicherheitsmaßnahmen, die an diesem Unterelement ansetzen, gibt es bislang jedoch vergleichsweise wenige, wie die Auswertung der Forschungsaktivitäten in den vorangegangenen Kapitel sowie der PIARC⁶⁷ ergaben. Fahrzeugbezogene Maßnahmen beschränken sich bislang darauf, die Pflicht zur Mitführung eines Feuerlöschers zu diskutieren, regelmäßige Fahrzeuginspektionen zu verlangen oder die Sicherheitsbestimmungen für den Transport gefährlicher Güter zu überarbeiten.⁶⁸ Ein direkter Bezug zu Fahrzeugsystemen ist nicht gegeben, obwohl gerade in Bezug auf die Unfallvermeidung und damit Verhinderung gefährlicher Situationen auch Systeme der aktiven Sicherheit, die in immer mehr Fahrzeugen verfügbar sind, berücksichtigt werden sollten.

Auch in einer Fortsetzungsstudie der PIARC aus dem Jahr 2008, in der Methoden der Risikoanalyse für Straßentunnel ausgewertet wurden, werden als Ansatzpunkte für Prävention und Folgenminderung vorwiegend konstruktive sowie betriebliche Maßnahmen genannt, wie z. B. sichere Design- und Konstruktionskriterien für neu zu erstellende Tunnelanlagen oder eine Re-Organisation des Tunnel-Managements.⁶⁹

2.3.3. Projekte innerhalb des 6. EU-Rahmenprogramms

Innerhalb des 6. EU-Rahmenprogramms finden sich ebenfalls einige Projekte, die sich mit der Sicherheit von Tunneln befassen. Sie entwickelten sich z. T. aus Projekten des 5. Rahmenprogramms bzw. setzen dort begonnene Arbeiten fort.⁷⁰

2.3.3.1. L-surF - Design Study for a Large Scale Underground Research Facility on Safety and Security

Ein Ergebnis der Forschungsarbeiten im 5. Rahmenprogramm war die Erkenntnis, dass die bislang nationalen Forschungseinrichtungen stärker koordiniert werden müssen, um die weitere Forschung zu Brandentstehung und -bekämpfung effizienter durchführen zu können. Dies gilt insbesondere auch für Ausbildung und Training von Einsatzkräften und sonstigem Personal, für das bislang keine international harmonisierten Vorschriften und Vorgehensweisen existieren, sondern nationale oder sogar regionale Einzellösungen zur

⁶⁶ Sajtar, L.; Walet, F.; Wielinga, L.: Integrated Approach to Road Tunnel Safety - PIARC Report 2007R07. PIARC Technical Committee Road Tunnel Operation (C3.3), La Défense Cedex, 2007, S. 37.

⁶⁷ Sajtar, L.; Walet, F.; Wielinga, L., a. a. O., S. 33.

⁶⁸ United Nations Economic Commission for Europe, Inland Transport Committee: Recommendations of the Group of Experts on Safety in Road Tunnels - UNECE-Report TRANS/AC.7/9. 2001, S. 42-43.

⁶⁹ Goncalves, N.; Guarascio, M.; Hall, R. et al.: Risk Analysis for Road Tunnels - PIARC Report 2008R02. PIARC Technical Committee Road Tunnel Operation (C3.3), Défense Cedex, 2008, S. 23.

⁷⁰ Khoury, G. A.: EU Tunnel Fire Safety Action. In: Tunnels and Tunnelling International April 2003. British Tunnelling Society, London, 2003. S. 20-23.

Anwendung kommen.⁷¹ Das Projekt L-surF, *Design Study for a Large Scale Underground Research Facility on Safety and Security*, das von März 2005 bis Februar 2008 bearbeitet wurde, hatte daher zum Ziel, eine neue, realitätsgetreue unterirdische Versuchsanlage zu konzipieren bzw. Konzepte für eine optimierte Zusammenarbeit bestehender Forschungseinrichtungen zu entwickeln und Businesspläne für die unterschiedlichen Varianten zu erstellen.⁷²

2.3.3.2. ITA-COSUF – International Tunneling Association Committee on Operational Safety of Underground Facilities

Zur optimalen Verwertung der Forschungsergebnisse aus den Projekten des 5. Rahmenprogramms wurde im Mai 2005 ein Konsortium namens COSUF, *Committee on Operational Safety of Underground Facilities*, ins Leben gerufen, das von der ITA, *International Tunnelling Association*, geleitet wird. Die Aufgaben des Komitees bestehen darin, ein Netzwerk zum Informationsaustausch bereitzustellen, weltweite Kooperationen zu fördern und die Sicherheit von Tunneln durch die Förderung von Innovationen und Öffentlichkeitsarbeit zu verbessern.⁷³ In der ITA sind insgesamt 53 Staaten zusammengeschlossen und die Arbeiten innerhalb des Projekts COSUF werden darüber hinaus in enger Kooperation mit der PIARC, *World Road Association*, durchgeführt.⁷⁴

2.3.3.3. EuroTAP – European Tunnel Assessment Programme

1999, nur wenige Tage nach dem schweren Unfall im Tauern-Tunnel, veröffentlichte der ADAC die Ergebnisse seines ersten Tunneltests. In den folgenden Jahren wurden bis 2004 insgesamt 144 Tunneltests durch den ADAC durchgeführt und parallel der Aufbau eines europäischen Testprogramms verfolgt. EuroTAP wurde 2005 für die Dauer von drei Jahren ins Leben gerufen und die Bearbeiter setzten sich aus zwölf Automobilklubs aus elf Ländern der Europäischen Union sowie dem europäischen Büro der FIA, *Fédération Internationale de l'Automobile* zusammen. Innerhalb des Programms wurden 150 Tunneltests durchgeführt, für die das Projektmanagement vom ADAC und die Projektkoordination von der FIA übernommen wurden.⁷⁵ Im ersten Schritt wurde die Testdurchführung überarbeitet und eine Methode zur Risiko- und Sicherheitsbewertung von Tunneln entwickelt, in die die bisherigen Verfahren und Erfahrungen der Mitgliedsländer einfließen.⁷⁶

⁷¹ Amberg, F.; Salvi, O.: Large Scale Experiments for Safety and Security in Tunnels and Underground Constructions - L-surF Project. 4. Internationaler Fachkongress Verkehr und Sicherheit in Straßentunneln, 25.-27. April 2007 in Hamburg, S. 2.

⁷² Siehe Amberg, F.: L-surF - Large Scale Underground Research Facility. 2nd International Symposium on Tunnel Safety and Security, 15.-17. März 2006 in Madrid, S. 3-4; und L-surF: Large Scale Underground Research Facility. www.l-surf.org, abgerufen am 2. März 2009.

⁷³ Haack, A.: ITA-COSUF Work Programme. 2nd Symposium Safe and Reliable Tunnels - Innovative European Achievements, 30.-31. Mai 2006 in Lausanne, S. 1.

⁷⁴ Haack, A.: Welcome and Introduction. 2nd Symposium Safe and Reliable Tunnels - Innovative European Achievements, 30.-31. Mai 2006 in Lausanne, S. 4.

⁷⁵ Sauter, R.: EuroTAP. 2nd Symposium Safe and Reliable Tunnels - Innovative European Achievements, 30.-31. Mai 2006 in Lausanne, S. 1.

⁷⁶ European Tunnel Assessment Programme: Tunnel Audit - Final Report. München, 2007, S. 133.

Die Durchführung der Tests bildete jedoch nur einen Teil des EuroTAP Programms, das unter dem Motto „Testing – Assessing – Informing – Improving“ stand.⁷⁷ In weiteren Arbeitspaketen wurden Schulungsmaßnahmen für Betriebs- und Rettungspersonal sowie Informationsprogramme für Autofahrer entwickelt, die als Flugblätter und in Form eines Computerspiels („*Safe in the Tunnel*“⁷⁸) veröffentlicht wurden.⁷⁹

Welche Beiträge zur Erhöhung der Sicherheit von Tunneln durch die Fahrzeugtechnik geleistet werden können, wurde innerhalb von EuroTAP nicht untersucht, wohl aber angenommen, dass eine positive Wirkung auf die Verkehrssituation im Tunnel erreicht wird, wenn die Fahrzeuge sicherer, zuverlässiger und mit Fahrerassistenzsystemen zur Unfallvermeidung ausgerüstet sind.⁸⁰

2.3.3.4. TUNCONSTRUCT

Im Rahmen dieses Projekts werden neue Methoden für Konstruktion, Bau und Risikobewertung von Tunnelbauwerken entwickelt. Hintergrund ist die Annahme, dass die Zahl der Tunnel in Europa in Zukunft zunehmen wird, um einen Teil der steigenden Verkehrsbelastung von der Oberfläche unter die Erde zu verlagern. Durch die neuen Methoden soll der Tunnelbau kostengünstiger, umweltfreundlicher und sicherer werden, sowohl während der Bau- als auch der Betriebsphase. Das Projekt begann im September 2005 und hatte eine Laufzeit bis August 2009. Beteiligt waren 41 Projektpartner aus elf europäischen Mitgliedsstaaten.⁸¹

2.3.4. Nationale Forschungsprojekte

2.3.4.1. ACTEURS – Amélioration du Couplage Tunnel-Exploitant-Usager pour Renforcer la Sécurité

Das Projekt ACTEURS, *Amélioration du Couplage Tunnel-Exploitant-Usager pour Renforcer la Sécurité*⁸², hatte zum Ziel, das Verhalten von Tunnelnutzern bei normaler Durchfahrt und in Notfallsituationen zu erforschen. Bearbeitet wurde das vom französischen Ministerium für Infrastruktur und Transport finanzierte Projekt von verschiedenen französischen Straßen- und Tunnelbetreibern⁸³ sowie dem Unternehmen Dédale, das sich mit Forschung und Entwicklung von Risikomanagementtools und insbesondere kogniti-

⁷⁷ European Tunnel Assessment Programme: EuroTAP for Safe Tunnels - Quality, Safety, Mobility, S. 6.

⁷⁸ Eine Online-Version kann unter <http://adac.3m5.de/eurotest/german.html> gespielt werden.

⁷⁹ Sauter, R.: EuroTAP. 2nd Symposium Safe and Reliable Tunnels - Innovative European Achievements, 30.-31. Mai 2006 in Lausanne, S. 5.

⁸⁰ European Tunnel Assessment Programme: Tunnel Audit - Final Report. München, 2007, S. 20.

⁸¹ TUNCONSTRUCT: Tunnel Construction. www.tunconstruct.org, abgerufen am 2. März 2009.

⁸² Deutsch: Verbesserung der Interaktion von Tunnel, Betreiber und Nutzer zur Erhöhung der Sicherheit, (eigene Übersetzung).

⁸³ Projektabschnitt 1, 2003-2005: ATMB (*Autoroutes et Tunnel du Mont Blanc*), AREA (*Société des Autoroutes Rhône-Alpes*) und SFTRF (*Société Française du Tunnel Routier du Fréjus*). Projektabschnitt 2, 2005-2006: ATMB (*Autoroutes et Tunnel du Mont Blanc*), APRR (*Autoroutes Paris-Rhin-Rhône*) und ES-COTA (*Société des Autoroutes Estérel, Côte d'Azur, Provence, Alpes*).

ven Aspekten befasst. Die Bearbeiter betonen, dass die Sicherheit eines offenen Systems, wie es ein Straßentunnel darstellt, nicht nur von dem Bauwerk selbst, seiner Ausrüstung sowie seinem Management und Betrieb abhängt, sondern vor allem auch von der Interaktion dieses Systems mit seinen Nutzern, ein Aspekt, der jedoch in bisherigen Forschungsprojekten vernachlässigt wurde.⁸⁴

Durch die Befragung von Tunnelnutzern in Interviews und mit Hilfe von Fragebögen wurde u. a. das Abstands- und Geschwindigkeitsverhalten untersucht. Die Ergebnisse werden in Kapitel 3.2.1 erläutert.

2.3.4.2. TCRP/NCHRP – Making Transportation Tunnels Safe

Der Bericht *Making Transportation Tunnels Safe* entstand aus einer Kooperation des TCRP, *Transit Cooperative Research Program*, mit dem NCHRP, *National Cooperative Highway Research Program*, in den USA, die sich mit den Themen Surface Transportation Security und Public Transportation Security befasste. Anlass für diese Forschungsarbeiten waren die Anschläge vom 11. September 2001 und daher behandeln die Ausführungen mögliche Schwachstellen von Tunneln im Hinblick auf terroristische Anschläge wie z. B. mit Sprengstoff oder chemischen Kampfmitteln und entsprechende physische bzw. organisatorische Gegenmaßnahmen. In Bezug auf eine Erhöhung der Verkehrssicherheit liefert der Bericht keine Ansatzpunkte.⁸⁵

2.3.4.3. Weitere Projekte

Neben den Aktivitäten innerhalb des 5. bzw. 6. EU-Rahmenprogramms und darauf aufbauenden Arbeiten gab es weitere nationale und internationale Forschungsarbeiten, die sich meist mit der Sicherheit eines bestimmten Tunnels bzw. Maßnahmen zu ihrer Verbesserung befassen. In Bezug auf diese spezifischen Projekte sei an dieser Stelle z. B. auf die Konferenzbände des alle zwei Jahre stattfindenden Fach-Kongresses *Verkehr und Sicherheit in Straßentunneln* hingewiesen.⁸⁶

2.4. Stand der Technik Tunnelsicherheit

Das Weißbuch der Europäischen Kommission „Die Europäische Verkehrspolitik bis 2010: Weichenstellungen für die Zukunft“ aus dem Jahr 2001 enthält im zweiten Teil „Engpässe beseitigen“ einen Absatz über die Tunnel im transeuropäischen Straßennetz (TERN). Diese Tunnel, die z. T. über 50 km lang sind, sind für den Waren- und Personenverkehr innerhalb der Europäischen Union von großer Bedeutung. Im Jahr 2001 gab es jedoch noch keine einheitlichen Rechtsvorschriften bezüglich der Sicherheitsstandards

⁸⁴ Ricard, F.: Résultats du projet ACTEURS sur le comportement des usagers en tunnel. 33. ASEACAP Study and Information Days, 22.-25. Mai 2005 in Wien, S. 1.

⁸⁵ National Cooperative Highway Research Program: Making Transportation Tunnels Safe and Secure - NCHRP-Report 525. Washington, 2006.

⁸⁶ Internationaler Fachkongress Verkehr und Sicherheit in Straßentunneln, Hamburg, 2001, 2003, 2005, 2007 und 2009.

dieser Anlagen und die vorhandenen Regelungen in den einzelnen Mitgliedsstaaten wichen stark voneinander ab. Im Weißbuch wurde daher das Ziel festgeschrieben, eine europäische Vorschrift zur Harmonisierung der Mindestsicherheitsnormen zu entwickeln und so eine hohe Sicherheit für die Verkehrsteilnehmer zu schaffen.⁸⁷

2.4.1. Richtlinie über die Mindestanforderungen an die Sicherheit von Straßentunneln

Als Folge der schweren Unfälle im Mont Blanc-, Tauern- und St. Gotthard-Tunnel⁸⁸ brachte die Europäische Kommission im Dezember 2002 einen Vorschlag für eine Richtlinie zur Tunnelsicherheit ein, die am 29. April 2004 als „Richtlinie 2004/54/EG des europäischen Parlaments und des Rates über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz“ erlassen wurde. Sie gilt für alle Tunnel des transeuropäischen Straßennetzes von mehr als 500 m Länge und musste bis 30. April 2006 von den Mitgliedsstaaten in nationales Recht umgesetzt werden. Inhaltlich baut die Richtlinie auf den Arbeiten der PIARC und UNECE auf, die im vorangegangenen Kapitel dargestellt wurden.⁸⁹ Neben Vorschriften zur Verwaltung und zum Management von Tunneln⁹⁰ fordert die Richtlinie die Durchführung von Risikoanalysen und regelt die Berichterstattung über Brände und Unfälle zwischen den Mitgliedstaaten.⁹¹ Des Weiteren enthält die Richtlinie drei Anhänge:

- Anhang I: Sicherheitsmaßnahmen⁹²
- Anhang II: Genehmigung des Entwurfs, Sicherheitsdokumentation, Inbetriebnahme des Tunnels, Veränderungen und periodische Übungen⁹³
- Anhang III: Beschilderung für Tunnel⁹⁴.

Von Relevanz für diese Arbeit ist insbesondere Anhang I, auf den im Folgenden näher eingegangen wird. Der Umfang der Sicherheitseinrichtungen, der in einem Tunnel mindestens vorhanden sein muss, richtet sich nach der Art des Tunnels und dem zu erwartenden Verkehrsaufkommen.⁹⁵ Die Art des Tunnels wird im Wesentlichen anhand der Parameter Länge und durchschnittlicher täglicher Verkehr (DTV) pro Fahrstreifen bestimmt. Es werden jedoch auch eine Reihe weiterer Parameter definiert, wie z. B. die Anzahl der Fahrstreifen oder Merkmale der Zufahrtsstraßen. Hat ein Tunnel in Bezug auf solche Parameter besondere Eigenschaften, muss in einer Risikoanalyse ermittelt werden, ob zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen, die über die Mindestanforderungen der Richtlinie hinausgehen, ergriffen werden müssen.

⁸⁷ N. N.: Richtlinie 2004/54/EG des europäischen Parlaments und des Rates über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz. In: Amtsblatt der Europäischen Union vom 30. April 2004, S. 66.

⁸⁸ Siehe Anhang A6.

⁸⁹ N. N.: Richtlinie 2004/54/EG, a. a. O., S. 42-45.

⁹⁰ N. N.: Richtlinie 2004/54/EG, a. a. O., S. 46-53.

⁹¹ N. N.: Richtlinie 2004/54/EG, a. a. O., S. 54-58.

⁹² N. N.: Richtlinie 2004/54/EG, a. a. O., S. 59-80.

⁹³ N. N.: Richtlinie 2004/54/EG, a. a. O., S. 81-86.

⁹⁴ N. N.: Richtlinie 2004/54/EG, a. a. O., S. 87-91.

⁹⁵ N. N.: Richtlinie 2004/54/EG, a. a. O., S. 42.

Anhang I enthält in Kapitel 2 eine Auflistung von infrastrukturbezogenen Sicherheitsmaßnahmen, die in Abhängigkeit von der Art des Tunnels vorgeschrieben oder empfohlen werden. Dazu zählen z. B. das Vorhandensein und die Abstände von Fluchtwegen und Notausgängen sowie Vorgaben in Bezug auf Beleuchtung, Lüftung, Wasserversorgung und Feuerfestigkeit. Des Weiteren sind in Kapitel 2 Vorschriften über Leitstellen, Überwachungssysteme, Kommunikationssysteme, die Stromversorgung und weitere Tunnelbetriebseinrichtungen enthalten.⁹⁶ Sicherheitsmaßnahmen, die den Tunnelbetrieb selbst betreffen, sind Gegenstand von Kapitel 3. In Kapitel 3.9 wird bspw. geregelt, welchen Mindestabstand Fahrzeuge unter normalen Bedingungen und im Stillstand einhalten sollten.⁹⁷ Abschließend wird in Kapitel 4 die regelmäßige Durchführung von Informationskampagnen für Tunnelnutzer vorgeschrieben, die das richtige Verhalten im Normalbetrieb, vor allem aber auch im Fall von Pannen, Staus, Unfällen oder Bränden zum Thema haben.⁹⁸

Wie eingangs erwähnt, beschränkt sich die Gültigkeit der EU-Richtlinie auf Tunnel, die Teil des transeuropäischen Straßennetzes TERN sind. Die Mitgliedsstaaten werden jedoch aufgefordert, auch in Tunneln außerhalb dieses Anwendungsbereichs für ein vergleichbares Sicherheitsniveau zu sorgen.⁹⁹ Für die bei Inkrafttreten der Richtlinie bereits vorhandenen Tunnel des TERN gilt eine Umsetzungsfrist bis 30. April 2014. Zu diesem Zeitpunkt müssen alle in der Richtlinie aufgelisteten Anforderungen erfüllt werden. Eine verlängerte Frist für Ausnahmefälle wurde bis 30. April 2019 gesetzt.¹⁰⁰

Die Umsetzung der Richtlinie in nationales Recht der Mitgliedsstaaten musste bis 30. April 2006 erfolgen. Aus diesem Grund wurden bspw. in Deutschland die *Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln* (RABT)¹⁰¹ aktualisiert und in Österreich das *Straßentunnelsicherheitsgesetz* (STSG)¹⁰² erlassen sowie die Straßenverkehrsordnung angepasst. Auch in der Schweiz ist die Richtlinie seit 1. Januar 2008 für Nationalstrassen gültig und für alle neuen Tunnel des TERN anzuwenden, obwohl sie nicht Mitglied der Europäischen Union ist.¹⁰³

⁹⁶ N. N.: Richtlinie 2004/54/EG des europäischen Parlaments und des Rates über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz. In: Amtsblatt der Europäischen Union vom 30. April 2004. S. 62-75.

⁹⁷ N. N.: Richtlinie 2004/54/EG, a. a. O., S. 76-79.

⁹⁸ N. N.: Richtlinie 2004/54/EG, a. a. O., S. 80.

⁹⁹ N. N.: Richtlinie 2004/54/EG, a. a. O., Erwägungsgrund 25, S. 44.

¹⁰⁰ ADAC: EU-Richtlinie: Kleine Schritte auf dem Weg zu mehr Sicherheit. http://www.adac.de/Tests/Mobilitaet_und_Reise/Tunnel/testjahr_2007/eu_richtlinie/default.asp?Co%20mponentID=180020&SourcePageID=179415, abgerufen am 23. Februar 2009.

¹⁰¹ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (Hrsg.): Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT). FGSV-Nr. 339. Köln, 2006.

¹⁰² N. N.: Straßentunnel-Sicherheitsgesetz - STSG und Änderung der Straßenverkehrsordnung 1960. In: Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich Nr. 54, ausgegeben am 8. Mai 2006.

¹⁰³ Touring Club Schweiz: EuroTAP-Sicherheitsprüfung der europäischen Tunnel 2009. Vier einröhriige Schweizer Hauptstrassentunnel im Test. http://www.tcs.ch/etc/medialib/main/rubriken/der_tcs/presse/pdf.Par.0136.File.tmp/Bericht_EuroTAP_2009_d.pdf, abgerufen am 14. April 2010.

2.4.2. Ergebnisse der EuroTAP-Tunnelbewertung

Wie in Kapitel 2.3.3.3 geschildert, werden im Rahmen des Projekts EuroTAP regelmäßig die sog. Tunneltests durchgeführt, in denen die Verkehrssicherheit von Straßentunneln bewertet wird. Die Testkriterien wurden mit der EU-Richtlinie nach deren Erlass abgeglichen und überarbeitet. Es wird dabei bemängelt, dass die EU-Richtlinie in einigen Punkten nicht konkret genug sei bzw. einige aus Sicht der EuroTAP-Experten unverzichtbare Kriterien nicht berücksichtige. Die Testkriterien innerhalb von EuroTAP sind daher strenger als die Vorgaben der Richtlinie. Es ist aber gewährleistet, dass ein Tunnel, der die Mindestanforderungen laut EU-Richtlinie erfüllt, im EuroTAP-Tunneltest die Note ausreichend erzielt.¹⁰⁴

Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse von 207 Tunneln, die in den Jahren 2004 bis 2008 bewertet wurden. 59 % aller Tunnel schlossen mit der Note *sehr gut* oder *gut* ab, können also nach dem Stand der Technik als verkehrssicher bezeichnet werden. 20 % der Tunnel erfüllen die Mindeststandards und erhielten die Note ausreichend, so dass insgesamt 79 % der getesteten Tunnel mindestens die Anforderungen der EU-Richtlinie erfüllen. Von den verbleibenden Tunneln erhielten allerdings 7 % die Note *bedenklich* und 14 % wurden mit *mangelhaft* bewertet, so dass immerhin etwa ein Fünftel der getesteten Tunnel die Mindestsicherheitsanforderungen laut EU-Richtlinie nicht erfüllt. Da die Auswahl der Tunnel nach ihrer Lage und ihrer Bedeutung für den Reise- und Güterverkehr ausgewählt wurden, besteht hier noch dringender Verbesserungsbedarf. Es ist außerdem zu beachten, dass es in Europa¹⁰⁵ etwa 700 Tunnel mit einer Länge von mehr als 1.000 m, so dass die EuroTAP-Tunneltests bislang nur weniger als ein Drittel des Bestands abdecken.¹⁰⁶

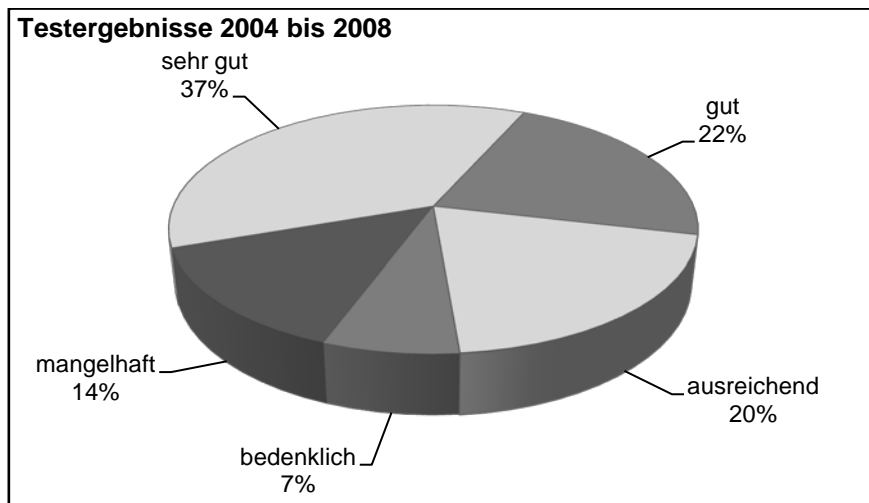


Abbildung 5: Ergebnisse der EuroTAP-Tunneltests 2004 bis 2008¹⁰⁷

¹⁰⁴ ADAC: Methodik: So haben wir getestet.

http://www.adac.de/Tests/Mobilitaet_und_Reise/Tunnel/testjahr_2007/Methodik/default.asp?ComponentID=179292&SourcePageID=179415, abgerufen am 23. Februar 2009.

¹⁰⁵ Gemeint ist nicht die Europäische Union, sondern Europa im Sinne der United Nations Economic Commission for Europe, was neben den EU-Staaten u. a. Israel und Russland umfasst.

¹⁰⁶ Pesut, A.; Smith, C.: Activities of the United Nations Economic Commission for Europe to Promote Safety in Tunnels. In: Routes/Roads Nr. 324, World Road Association, 2004, S. 83.

¹⁰⁷ Eigene Auswertung der für die Jahre 2004 bis 2008 unter www.adac.de verfügbaren Daten.

Zur Verbesserung der Sicherheit wird u. a. gefordert, die Autofahrer besser über das richtige Verhalten im Tunnel zu informieren und sie während der Durchfahrt zur Einhaltung eines ausreichend großen Sicherheitsabstands aufzufordern. Auch kurzfristig umsetzbare bauliche Maßnahmen wie z. B. eine Verbesserung der Orientierung durch helle Tunnelwände und eine Markierung des Fahrbahnrandes durch Leuchtdioden können die Sicherheit eines Tunnels verbessern.¹⁰⁸

2.5. Fazit zum Stand der Forschung und Technik

In den vergangenen zehn Jahren wurde eine Vielzahl an Forschungsprojekten mit dem Ziel, die Sicherheit von Straßentunneln zu erhöhen, durchgeführt. Unterschiedliche Aspekte wurden dabei analysiert, wobei die Brandentdeckung und -bekämpfung aufgrund der großen Gefahr, die im Tunnel von Feuer ausgeht, im Mittelpunkt stand.

Die Rolle der Fahrer wird in der Regel im Hinblick auf das richtige Verhalten während der Fahrt sowie bei der Rettung und Selbstrettung betrachtet. Die Fahrzeuge als Systemelement spielen eine untergeordnete Rolle, wenn man vom Sonderfall der Gefahrguttransporte absieht. Es kann jedoch angenommen werden, dass eine Interaktion von Tunnel- und Fahrzeugsicherheitssystemen einen wesentlichen Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit von Tunnelfahrten leisten kann. Diese These wird im weiteren Verlauf der Arbeit geprüft.

¹⁰⁸ Weitere Empfehlungen zur Erhöhung der Sicherheit finden sich unter: ADAC: Empfehlungen: So können Tunnelbetreiber für Sicherheit sorgen.
http://www.adac.de/Tests/Mobilitaet_und_Reise/Tunnel/testjahr_2007/Empfehlungen/default.asp?ComponentID=179325&SourcePageID=179415, abgerufen am 24. Februar 2009.

3. Erfassung und Analyse des Unfallgeschehens in Straßentunneln

3.1. Erfassung des Unfallgeschehens

Untersuchungen oder Datensammlungen, die sich speziell mit Unfällen in Straßentunneln befassen, gibt es in Europa nur wenige, für Deutschland sind diese Daten bislang nicht verfügbar. Studien aus dem europäischen und außereuropäischen Ausland befassen sich zumeist mit konkreten Ereignissen besonderer Schwere, für die detaillierte Analysen erstellt und veröffentlicht werden. Das allgemeine Unfallgeschehen in Tunneln wurde bislang dagegen kaum eingehend untersucht, und die Verfügbarkeit von Daten ist begrenzt. Zwar wurde vom ADAC im Rahmen seiner Tunnel-Sicherheitsinitiative eine Chronologie weltweiter schwerer Tunnelunfälle seit 1971 veröffentlicht,¹⁰⁹ doch deren Beschreibung ist sehr knapp und nicht für eine Auswertung in Bezug auf die Unfallursachen geeignet. Gleiches gilt für eine Zusammenstellung von Unfalldaten für Straßen-, Eisenbahn- und Metrotunnels, die innerhalb des EU-Projekts SafeT, Arbeitspaket 4, entstand.^{110,111}

Die Grundlage für die vorliegende Arbeit bilden daher zwei Studien aus Österreich und der Schweiz, in denen detaillierte Daten zu Unfallereignissen in Straßentunneln ausgewertet wurden.

- Robatsch, K.; Nussbaumer, C.: Sicherheitsvergleich von Tunnels. Verkehrssicherheitsvergleich von Tunnels mit Gegenverkehr und Tunnels mit Richtungsverkehr mit anderen Straßenarten, 2005. Ausgewertet werden 528 Tunnelunfälle mit Personenschaden aus den Jahren 1999-2003.¹¹²
- Salvisberg, U.; Allenbach, R.; Cavegn, M.; Hubacher, M.; Siegrist, S.: Verkehrssicherheit in Autobahn- und Autostrassentunneln des Nationalstrassennetzes, 2004. Untersuchung von Unfallursachen und Einflussfaktoren anhand von 126 Tunneln.

Das besondere Interesse der Schweiz und Österreichs an einer detaillierten Analyse von Tunnelunfällen liegt darin begründet, dass die Gesamttunnelstrecke in diesen beiden Staaten jeweils mehr als 170 km beträgt und sie damit die Spitzenplätze in Europa einnehmen. In Großbritannien, Belgien, Deutschland und Spanien sind nur jeweils 30 bis 100 km an

¹⁰⁹ ADAC: Chronologie: Schwere Tunnelunfälle seit 1971.

http://www.adac.de/Tests/Mobilitaet_und_Reise/Tunnel/testjahr_2008/chronologie/default.asp?Com%20ponentID=214778&SourcePageID=212840, abgerufen am 19. November 2008.

¹¹⁰ D'Alessio, C.; Matarese, F.; Neri, I.: SafeT Work Package 4 Part I: Tunnel Accident Data and Review of Accident Investigation Methodologies, 2005.

¹¹¹ Krausmann, E.; Mushtaq, F.: SafeT Work Package 4 Part II: Analysis of Tunnel-accident Data and Recommendations for Data Collection and Accident Investigation. 2005.

¹¹² Es handelt sich dabei um die Fortschreibung der Studie: Robatsch, K.; Nussbaumer, C.: Tunnels mit Gegenverkehr und Richtungsverkehr. Verkehrssicherheitsvergleich von Tunnels mit anderen Straßenarten, 2004, in der 212 Tunnelunfälle mit Personenschaden von 1999-2001 ausgewertet wurden.

Tunnelstrecken vorhanden, in den meisten Ländern der europäischen Union¹¹³ weniger als 20 km. In Estland und Polen gibt es gar keine Straßentunnel.¹¹⁴

3.1.1. Tunnelunfälle in Österreich

In Österreich ereignen sich pro Jahr durchschnittlich 88 Unfälle mit Personenschaden in Autobahn- und Schnellstraßentunneln, in denen pro Jahr 13 Menschen getötet und 132 verletzt werden.¹¹⁵ Die Analyse der Unfalldaten erfolgt in der Studie von Robatsch/Nussbaumer anhand der nachfolgend aufgeführten Kennwerte.^{116, 117}

$$\text{Unfallrate } U_{R,\ddot{O}} = \frac{UPS * 10^6}{DTV * l * 365} \quad (1)$$

= Anzahl der Unfälle mit Personenschaden pro Million Fahrzeugkilometer

$$\text{Verunglücktenrate } V_{R,\ddot{O}} = \frac{V * 10^6}{DTV * l * 365} \quad (2)$$

= Verunglückte pro Million Fahrzeugkilometer

$$\text{Getötetenrate } G_{R,\ddot{O}} = \frac{G * 10^9}{DTV * l * 365} \quad (3)$$

= Anzahl der Getöteten pro Milliarde Fahrzeugkilometer

mit

UPS = Anzahl der Unfälle mit Personenschaden

DTV = durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke in Anzahl der Fahrzeuge pro Tag

l = Länge des Tunnels in km

V = Anzahl der Verunglückten¹¹⁸

G = Anzahl der Getöteten

¹¹³ Teilnehmer der SATRE-Studie waren: Frankreich, Belgien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Griechenland, Großbritannien, Irland, Italien, Kroatien, Niederlande, Österreich, Polen, Portugal, Schweden, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechien, Ungarn, Zypern.

¹¹⁴ SARTRE Consortium: European Drivers and Road Risk - Part 1: Report on Principle Analyses. 2004, S. 257.

¹¹⁵ Robatsch, K.; Nussbaumer, C.: Sicherheitsvergleich von Tunnels - Verkehrssicherheitsvergleich von Tunnels mit Gegenverkehr und Tunnels mit Richtungsverkehr mit anderen Straßenarten. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg.): Schriftenreihe Straßenforschung Heft 552, Wien, 2005, S. 8.

¹¹⁶ Robatsch, K.; Nussbaumer, C., a. a. O., S. 3: „Ein Straßenverkehrsunfall mit Personenschaden liegt dann vor, wenn durch ein plötzlich eintretendes, mit dem Verkehr auf öffentlichen Verkehrsflächen zusammenhängendes Ereignis Personen getötet, verletzt oder sonst in ihrer Gesundheit geschädigt werden und daran zumindest ein in Bewegung befindliches Fahrzeug beteiligt ist.“

¹¹⁷ Die Formelzeichen für die Unfallkennwerte werden hier mit zusätzlichem Index „Ö“ gekennzeichnet. Dies geschieht zur Abgrenzung von den im anschließenden Kapitel erläuterten Schweizer (S) Kennwerten.

¹¹⁸ Bei Salvisberg et al. als Anzahl der Verunfallten bezeichnet. In beiden Fällen ist die Summe aus Getöteten sowie leicht und schwer Verletzten gemeint.

In Tabelle 5 sind die Unfallkennzahlen für die Jahre 1999-2003 angegeben. Robatsch/Nussbaumer kommen zu dem Ergebnis, dass die Unfallrate im Tunnel bezogen auf die Fahrleistung und verglichen mit Autobahnen bzw. Landstraßen am geringsten ist. Die Getötetenrate ist höher als auf Autobahnen und Schnellstraßen, aber geringer als auf Landesstraßen im Freiland. Die Erkenntnisse lassen sich dahingehend zusammenfassen, dass das Risiko, in einem Tunnel einen Unfall zu erleiden, geringer als auf Autobahnen und Schnellstraßen ist, dass dabei aber eine höhere Gefahr besteht, getötet zu werden.¹¹⁹

Tabelle 5: Unfallkennzahlen für Österreichische Straßentunnel 1999-2003¹²⁰

Kennzahl	Autobahn	Schnellstraße	Landesstraße im Freiland	Tunnel
Unfallrate $U_{R,\text{Ö}}$ 1999-2003 Unfälle mit Personenschaden pro 1 Million Fzg-km	0,137	0,151	0,433	0,104
Verunglücktenrate $V_{R,\text{Ö}}$ 1999-2003 Verunfallte pro 1 Million. Fzg-km	0,224	0,227	0,662	0,186
Getötetenrate $G_{R,\text{Ö}}$ 1999-2003 Getötete pro 1 Milliarde Fzg-km	7,4	15,3	20,1	15,4

3.1.2. Tunnelunfälle in der Schweiz

Untersuchungsgegenstand der Studie von Salvisberg et al. sind die polizeilich erfassten Unfalldaten für 126 Tunnel, die Teil des Nationalstraßennetzes der Schweiz sind. Der Begriff Nationalstraße darf nicht mit der deutschen Autobahn gleichgesetzt werden, da er sich in erster Linie danach richtet, wer den Bau einer bestimmten Straße finanziert hat. Zu den Nationalstraßen zählen daher neben Autobahnen und Autostraßen auch Hauptstraßen, die vom Bund finanziert wurden. Letztere sind allerdings nicht in den analysierten Unfalldaten enthalten.¹²¹

In den Jahren 1992 bis 2002 ereigneten sich im Durchschnitt 539 Unfälle in Schweizer Autobahn- und Autostraßentunneln, in denen pro Jahr 250 Menschen verletzt und 7 getötet wurden.¹²² Zur Bewertung des Unfallgeschehens in Tunneln wird es anhand der folgenden Unfallkennzahlen mit dem Geschehen auf nicht-überbauten Nationalstraßen verglichen:^{123,124}

¹¹⁹ Robatsch, K.; Nussbaumer, C.: Sicherheitsvergleich von Tunnels - Verkehrssicherheitsvergleich von Tunnels mit Gegenverkehr und Tunnels mit Richtungsverkehr mit anderen Straßenarten. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg.): Schriftenreihe Straßenforschung Heft 552, Wien, 2005, S. 6-7.

¹²⁰ Robatsch, K.; Nussbaumer, C., a. a. O., S. 6.

¹²¹ Salvisberg, U.; Allenbach, R.; Cavegn, M. et al.: Verkehrssicherheit in Autobahn- und Autostrassentunneln des Nationalstrassennetzes - bfu-Report Nr. 51/2004. Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung (bfu), Bern, 2004, S. 10.

¹²² Eigene Berechnung nach Datentabelle in Salvisberg, U.; Allenbach, R.; Cavegn, M. et al.: Verkehrssicherheit in Autobahn- und Autostrassentunneln des Nationalstrassennetzes - bfu-Report Nr. 51/2004. Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung (bfu), Bern, 2004, S. 7.

¹²³ Salvisberg, U.; Allenbach, R.; Cavegn, M. et al., a. a. O., S. 34.

¹²⁴ Die Formelzeichen für die Unfallkennwerte werden hier mit zusätzlichem Index „S“ gekennzeichnet. Dies geschieht zur Abgrenzung von den im vorherigen Kapitel erläuterten Österreichischen (Ö) Kennwerten.

$$\text{Unfallrate } U_{R,S} = \frac{U * 10^6}{DTV * l * 365} \quad (4)$$

= Anzahl aller Unfälle pro Million Fahrzeugkilometer

$$\text{Verunfalltenrate } V_{R,S} = \frac{V * 10^8}{DTV * l * 365} \quad (5)$$

= Anzahl der Verunfallten (Verletzte und Getötete) pro 100 Millionen Fahrzeugkilometer mit

U = Anzahl der Unfälle

DTV = durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke [Anz. Fzg. pro Tag]

l = Länge des Tunnels [km]

V = Anzahl der Verunfallten¹²⁵

Im Gegensatz zu Robatsch/Nussbaumer gehen bei Salvisberg et al. nicht nur die Unfälle mit Personenschaden sondern alle Unfälle in die Berechnung mit ein. Die in den beiden Studien ermittelten Unfallraten können daher nicht direkt miteinander verglichen werden, sondern nur in ihrer Relation bezüglich der verschiedenen Streckenarten.

Die Kennzahlen für das Jahr 1999 bzw. für den Zeitraum 1999-2002 zeigt Tabelle 6. Sie zeigen, ebenso wie die Studie von Robatsch/Nussbaumer, dass in Tunneln bezogen auf die Fahrleistung weniger Unfälle passieren als auf freier Strecke. Die Verunfalltenrate für das Jahr 1999 ist für Tunnel dagegen etwas höher als für die freie Strecke und die Unfallschwere für den Zeitraum 1992 bis 2002 ebenso.

Tabelle 6: Unfallkennzahlen für Schweizer Straßentunnel 1999 bzw. 1999-2002¹²⁶

Kennzahl	Freie Strecke	Tunnel
Unfallrate $U_{R,S}$ 1999 Unfälle pro 1 Million. Fzg-km	0,47	0,35
Verunfalltenrate $V_{R,S}$ 1999 Verunfallte pro 100 Million Fzg-km	19,6	19,8
Bezogen auf 1 Million Fzg-km zur besseren Vergleichbarkeit mit $V_{R,O}$:	0,196	0,198
Unfallschwere 1992-2002 Getötete pro 100 Verunfallte	2,7	2,8

¹²⁵ Bei Robatsch/Nussbaumer als Anzahl der Verunglückten bezeichnet. In beiden Fällen ist die Summe aus Getöteten sowie leicht und schwer Verletzten gemeint.

¹²⁶ Salvisberg, U.; Allenbach, R.; Cavegn, M. et al.: Verkehrssicherheit in Autobahn- und Autostrassentunneln des Nationalstrassennetzes - bfu-Report Nr. 51/2004. Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung (bfu), Bern, 2004, S. 3.

3.2. Einflussfaktoren auf das Unfallgeschehen

Das Unfallgeschehen in Straßentunneln wird von einer Reihe von Faktoren beeinflusst. Zu unterscheiden sind dabei fahrerbezogene sowie verkehrsbedingte und bauliche Einflüsse, die im Folgenden erläutert werden.

3.2.1. Fahrerbezogene Einflüsse

Ein Straßentunnel ist eine außergewöhnliche Umgebung, die sowohl positive als auch negative Einflüsse auf die Tunnelnutzer hat.

3.2.1.1. Positive Einflüsse auf die Sicherheit

Die Tatsache, dass ein Tunnel eine außergewöhnliche bzw. ungewohnte Umgebung ist, kann ein positiver Einfluss auf die Sicherheit sein, da die Aufmerksamkeit der Fahrer gesteigert wird. Das subjektive Unsicherheitsgefühl führt dazu, dass die Fahrer sich sicherheitsorientiert und aufmerksam verhalten. Für diese These spricht eine Untersuchung, in der Autofahrer zunächst befragt wurden, wie sie das Befahren eines Tunnels empfinden und danach eine Tunnelstrecke in einem Fahrsimulator zurücklegen mussten. Die Probanden, die zuvor angegeben hatten, dass sie Tunnel ablehnen, fuhren in der Simulation mit einer geringeren Durchschnittsgeschwindigkeit und vorsichtiger als Fahrer, die keine Bedenken hatte.¹²⁷

Ein weiterer positiver Aspekt besteht darin, dass mit Ausnahme der Ein- und Ausfahrtsbereiche im Tunnel keine Witterungseinflüsse vorhanden sind. Außerdem ist positiv, dass Tunnelstrecken in der Regel eine einfache, nicht komplexe Streckenführung haben, die keine großen Herausforderungen beinhaltet. Die Umgebung ist darüber hinaus informationsarm, da Bebauung, Bepflanzung, Fußgänger usw. fehlen, was die Ablenkungsgefahr reduziert. Die Begrenzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit setzt das Risiko ebenfalls herab.¹²⁸

3.2.1.2. Negative Einflüsse auf die Sicherheit

Das zuvor genannte subjektive Unsicherheitsgefühl kann neben einer positiv zu bewertenden erhöhten Aufmerksamkeit jedoch auch einen negativen Einfluss auf die Sicherheit haben. Das gleiche gilt für die reizarme Umgebung, die zwar eine übermäßige Ablenkung

¹²⁷ Flø, M.; Jenssen, G.: Drivers' Perception of Long Tunnels. Studies from the Quinling Shongan Tunnel in China as well as the Lærdal Tunnel and the World Longest Sub Sea Tunnel (Rogfast) in Norway. 4. Internationaler Fachkongress Verkehr und Sicherheit in Straßentunneln, 25.-27. April 2007 in Hamburg, S. 9.

¹²⁸ Salvisberg, U.; Allenbach, R.; Cavegn, M. et al.: Verkehrssicherheit in Autobahn- und Autostrassentunneln des Nationalstrassennetzes - bfu-Report Nr. 51/2004. Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung (bfu), Bern, 2004, S. 60.

der Fahrer verhindert, aber durch ihre Gleichförmigkeit auch Langweile und damit Unaufmerksamkeit verursachen kann.¹²⁹

Hinzu kommt, dass viele Menschen die geschlossene Umgebung als unangenehm empfinden oder sogar Angstgefühle entwickeln, wie in mehreren Untersuchungen gezeigt wurde:

SARTRE3: Social Attitudes to Road Traffic Risk of Car Drivers in Europe (Europa)

Fahrten durch längere Straßentunnel werden als sehr oder ziemlich beängstigend¹³⁰ empfunden: Frankreich: 38 % (höchster Wert), Dänemark: 9 % (niedrigster Wert), Deutschland: 17 %. Mittelwert über alle teilnehmenden Staaten: 17 %. Fahrer, die zuvor angegebenen hatten, nie durch längere Tunnel zu fahren, wurden nicht nach ihrer Befindlichkeit in Bezug auf Tunnel gefragt.¹³¹

Drivers' Perception in Long Tunnels (Norwegen)

Die Befragten bestätigten die folgenden Aussagen: Fahrten durch längere Tunnel sind unangenehm, 15 %; Fahrten durch längere Tunnel sind beunruhigend, 20 %. Anteil der Fahrer, die Tunneln ablehnend gegenüberstehen: 6-9 %. Anteil der Fahrer, die Tunneln sehr ablehnend gegenüberstehen: 4 %. Diese Fahrer gaben an, eher einen Umweg in Kauf zu nehmen als durch einen Tunnel zu fahren.¹³²

IPSOS-Befragung zur Tunnelangst (Deutschland)

Gefragt wurde, was bei der Fahrt durch einen Tunnel am meisten Schwierigkeiten macht. Es konnten bis zu drei Angaben gemacht werden: Angst vor Feuer, 33 %; Röhrenangst, 31 %; keine Schwierigkeiten 20 %.¹³³

Analyse von Tunnelgestaltungselementen (Österreich)

Eine Versuchsfahrt durch mehrere Tunnel wurde von den Fahrern wie folgt empfunden: sicher, 61,4 %; irritierend, 20,5 %; bedrohlich, 12 %; beengend, 6 %.¹³⁴

¹²⁹ United Nations Economic Commission for Europe, Inland Transport Committee: Recommendations of the Group of Experts on Safety in Road Tunnels - UNECE-Report TRANS/AC.7/9. 2001, S. 45.

¹³⁰ „very or fairly frightened“

¹³¹ SARTRE Consortium: European Drivers and Road Risk - Part 1: Report on Principle Analyses. 2004, S. 98-99. Teilnehmende Staaten: Frankreich, Belgien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Griechenland, Großbritannien, Irland, Italien, Kroatien, Niederlande, Österreich, Polen, Portugal, Schweden, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechien, Ungarn und Zypern.

¹³² Flø, M.; Jenssen, G.: Drivers' Perception of Long Tunnels. Studies from the Quinling Shongan Tunnel in China as well as the Lærdal Tunnel and the World Longest Sub Sea Tunnel (Rogfast) in Norway. 4. Internationaler Fachkongress Verkehr und Sicherheit in Straßentunneln, 25.-27. April 2007 in Hamburg, S.1.

¹³³ Ipsos Deutschland GmbH: Umfrage zu Schwierigkeiten im Autotunnel im Auftrag des Deutschen Verkehrssicherheitsrats e. V. - Studie Nr. 2518DZ00 (1732/1733). Hamburg, 2001, S. 1.

¹³⁴ Christ, R.; Smuc, M.; Gatscha, M.; Milanovic, M.: Analyse von Tunnelgestaltungselementen - Zusammenfassender Bericht aus Befragung und Befahrung. Kuratorium für Verkehrssicherheit, Institut für Verkehrspsychologie, Wien, 2002, S. 11 und S. 42.

Befragung im San Bernadino-Tunnel (Schweiz)

40 % der untersuchten und befragten Fahrer zeigten eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Veränderung des „Angstparameters“ Herzfrequenz. Die Zunahme betrug durchschnittlich 10,5 %.¹³⁵

ACTEURS: Amélioration du Couplage Tunnel-Exploitant-Usager pour Renforcer la Sécurité (Frankreich)

Die Fahrt durch einen Tunnel ist anstrengend/belastend¹³⁶: 19 %. Alle Befragten gaben an, dass sie ein Gefühl der Erleichterung verspüren, wenn sie sich der Tunnelausfahrt nähern.¹³⁷

In diesem Projekt im Fréjus-Tunnel wurde außerdem das Abstands- und Geschwindigkeitsverhalten von Fahrern in Straßentunneln untersucht. Dabei zeigte sich, dass das Einhalten der Maximalgeschwindigkeit weniger ein Problem ist, da die Fahrer mögliche Sanktionen fürchten. Problematisch ist hingegen das Abstandsverhalten der beobachteten Fahrer, da der Umstand, dass die Fahrt in einem Tunnel erfolgte, bei der Abstandswahl nicht berücksichtigt wurde. Die Mehrzahl der Fahrer wählte „aus dem Gefühl heraus“ den gleichen Abstand, der auch auf freier Strecke als komfortabel empfunden wird. Leuchtbaken, die im Fréjus-Tunnel installiert sind, um die Fahrer bei der Einhaltung des Sicherheitsabstands zu unterstützen, wurden von den befragten Fahrern nicht verstanden und blieben daher ohne Wirkung. Die Vorschriften zum Mindestabstand im Falle einer Verkehrsstockung oder eines Staus sowie zur Minimalgeschwindigkeit waren nicht bekannt und wurden nicht befolgt.¹³⁸

3.2.2. Verkehrsbedingte und bauliche Einflüsse

Salvisberg et al. untersuchten in ihrer Studie, welche anlagen- und/oder betriebstechnischen Merkmale für die Sicherheit von Tunnelanlagen von Bedeutung sind. Hierfür wurden die Unfalldaten der Jahre 1995 bis 1999 von 146 Tunneln in Verbindung mit den in Tabelle 7 aufgeführten Merkmalen untersucht.

Tabelle 7: Tunnelmerkmale mit Einfluss auf die Verkehrssicherheit¹³⁹

Merkmale		
Tunnellänge	Bankethöhe	Röhrigkeit (mit/ohne Gegenverkehr)
Kurvigkeit	Bankettbreite	Durchschnittlicher täglicher Verkehr (DTV)
Längsneigung	Fahrstreifenbreite	Anteil Schwerverkehr am DTV
Raumhöhe	Leuchtdichte	Signalisierte/zulässige Höchstgeschwindigkeit

¹³⁵ Schweizer Forschungsstelle für Verkehrsmedizin: Sind lange Tunnelfahrten psychisch belastend? Eine Untersuchung über die Tunnelangst. In: Automobil Revue 73, Nr. 33, 1978, S. 21.

¹³⁶ „Pour 19 % des répondants, la traversée du tunnel est jugée éprouvante“

¹³⁷ Ricard, F.: Résultats du projet ACTEURS sur le comportement des usagers en tunnel. 33. ASEACAP Study and Information Days, 22.-25. Mai 2005 in Wien, S. 5-7.

¹³⁸ Ricard, F., a. a. O., S. 6.

¹³⁹ Salvisberg, U.; Allenbach, R.; Cavegn, M. et al.: Verkehrssicherheit in Autobahn- und Autostrassentunneln des Nationalstrassennetzes - bfu-Report Nr. 51/2004. Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung (bfu), Bern, 2004, S. 42.

Die Auswertung in Form einer multivariaten Analyse ergab, dass fünf der genannten Merkmale deutliche Auswirkungen auf das Unfallgeschehen haben: Tunnellänge, DTV, Anteil des Schwerverkehrs am DTV, Richtungs-/Gegenverkehr und Bankettbreite.

Diese fünf Merkmale erklären gemeinsam 90 % der Varianz der Unfälle in den 146 untersuchten Tunneln. Für die weiteren in Tabelle 7 genannten Merkmale konnte kein statistisch signifikanter Zusammenhang mit Unfall- und Verunfalltenrisiko festgestellt werden. Die Ergebnisse zum Einfluss dieser Tunnelmerkmale auf das Unfallgeschehen sind in Tabelle 8 zusammengefasst. Zu beachten ist, dass die Aussagen nur für den jeweils angegebenen Wertebereich gültig sind.

Tabelle 8: Risikoänderung in Prozent bei einer Verdoppelung der Ausprägung der unabhängigen Variable^{140,141}

Unabhängige Variable	Gültiger Wertebereich	Unfallrisiko	Verunfalltenrisiko
Tunnellänge	200 - 17.000 m	- 32 %	- 20 %
Erläuterung:	In einem Tunnel, der zweimal so lang ist wie ein Vergleichstunnel, sind nicht doppelt so viele Unfälle bzw. Verunfallte beobachtbar. Die Unfallzahlen steigen nur um den Faktor 1,68 (=2-0,32) und die Verunfalltenzahlen um den Faktor 1,8 (=2-0,2).		
DTV	2.000 - 100.000	+ 77 %	+ 38 %
Erläuterung:	Eine Verdopplung des DTV hat nicht eine Verdopplung des Unfallgeschehens zur Folge, sondern erhöht das Unfallrisiko überproportional um den Faktor 2,77 (=2+0,77) und das Verunfalltenrisiko um den Faktor 2,38 (=2+0,38).		
Röhren¹⁴²	1 bzw. 2	- 45 %	- 53 %
Erläuterung:	Unfallrisiko und Verunfalltenrisiko sind in einem Tunnel mit Gegenverkehr, ungefähr doppelt so hoch wie in einem Tunnel mit Richtungsverkehr.		
Anteil des schweren Güterverkehrs am DTV	2,5 - 23 %	n. s.	+ 31 %
Erläuterung:	Der Anteil des schweren Güterverkehrs am DTV hat keinen signifikanten Einfluss auf das Unfallrisiko. Eine Verdoppelung des Anteils hat allerdings eine Erhöhung des Verunfalltenrisikos um den Faktor 2,31 (=2+0,31) zur Folge.		
Bankettbreite	0,5 - 2,8 m	- 43 %	n. s.
Erläuterung:	Die Bankettbreite hat keinen Einfluss auf das Verunfalltenrisiko, aber auf das Unfallrisiko. Eine Verdopplung der Bankettbreite bewirkt, dass das Unfallrisiko nur um den Faktor 1,57 (=2-0,43) steigt.		

¹⁴⁰ Salvisberg, U.; Allenbach, R.; Cavegn, M. et al.: Verkehrssicherheit in Autobahn- und Autostrassentunneln des Nationalstrassennetzes - bfu-Report Nr. 51/2004. Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung (bfu), Bern, 2004, S. 56-57.

¹⁴¹ Grundlage der multivariaten Analyse waren alle Tunnelanlagen des Nationalstraßennetzes mit einer Länge von mehr als 200 m.

¹⁴² Die Prozentangaben beziehen sich auf zweiröhrige Tunnelanlagen (Richtungsverkehr) im Vergleich zu einröhrigen (Gegenverkehr).

3.3. Unfalltypen

In der Unfallforschung gibt der Unfalltyp Auskunft darüber, aus welchem Verkehrsvorgang bzw. aus welcher Konfliktsituation heraus ein Unfall entstanden ist, z. B. beim Abbiegen.¹⁴³ Die Bezeichnungen der Unfalltypen sind in Deutschland, Österreich und der Schweiz unterschiedlich, wie Tabelle 9 zeigt.

Tabelle 9: Gegenüberstellung österreichischer, schweizerischer und deutscher Unfalltypenbezeichnungen

Deutschland ¹⁴⁴	Schweiz ¹⁴⁵	Österreich ¹⁴⁶
Unfall im Längsverkehr mit einem Fahrzeug im eigenen Fahrstreifen	Auffahrunfall	Richtungsunfall
Unfall im Längsverkehr mit einem Fahrzeug, das seitlich in gleicher Richtung fährt	Vorbeifahrunfall	
Fahrunfall, d. h. Abkommen von der Fahrbahn nach links oder rechts	Schleuder- /Selbstunfall	Alleinunfall

In Tabelle 10 ist das Ergebnis der Unfalltyp-Analyse für die Schweiz im Jahr 2002 dargestellt. Den größten Anteil nehmen mit 42 % Auffahrunfälle bzw. nach deutscher Bezeichnung Unfälle im Längsverkehr mit einem Fahrzeug im eigenen Fahrstreifen ein. Darauf folgen Schleuder-/Selbstunfälle, d. h. Fahrunfälle, mit 34 %. Unfälle im Längsverkehr mit einem Fahrzeug, das seitlich in gleicher Richtung fährt, werden als Vorbeifahrunfall bezeichnet und sind der dritthäufigste Unfalltyp. Allerdings ist ihr Anteil mit 12 % deutlich geringer. Begegnungsunfälle, bei denen ein Zusammenstoß mit einem entgegenkommenden Fahrzeug vorliegt, sind nur in Tunneln mit Gegenverkehr von Relevanz, da sie bei Richtungsverkehr nur in außergewöhnlichen Fällen, wie z. B. dem Auftreten eines Geis-terfahrs, möglich sind.

¹⁴³ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Merkblatt für die Auswertung von Straßenverkehrsunfällen. Nach: Wiltshko, T.: Sichere Information durch infrastrukturgestützte Fahrerassistenzsysteme zur Steigerung der Verkehrssicherheit an Straßenknotenpunkten. VDI Reihe 12 Nr. 570. VDI, Düsseldorf, 2004, S. 11.

¹⁴⁴ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), a. a. O.

¹⁴⁵ Salvisberg, U.; Allenbach, R.; Cavegn, M. et al.: Verkehrssicherheit in Autobahn- und Autostrassentunneln des Nationalstrassennetzes - bfu-Report Nr. 51/2004. Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung (bfu), Bern, 2004.

¹⁴⁶ Robatsch, K.; Nussbaumer, C.: Sicherheitsvergleich von Tunneln - Verkehrssicherheitsvergleich von Tunneln mit Gegenverkehr und Tunneln mit Richtungsverkehr mit anderen Straßenarten. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg.): Schriftenreihe Straßenforschung Heft 552, Wien, 2005.

Tabelle 10: Unfalltypen im Tunnel und auf freier Strecke, Schweiz 2002¹⁴⁷

Unfalltyp:	Total		Freie Strecke		Tunnel*	
	abs.	%	abs.	%	abs.	%
Schleuder- /Selbstunfall	4.296	53	4.100	54	196	34
Begegnungsunfall	54	1	34	1	20	4
Überholunfall	395	5	369	5	26	5
Auffahrunfall	2.007	24	1.767	23	240	42
Vorbeifahrunfall	890	11	820	11	70	12
Andere	455	6	437	6	18	3
Gesamt	8.097	100	7.527	100	570	100

* 46 Tunnel mit Gegen-, 100 mit Richtungsverkehr

Für die österreichische Analyse wurden die Unfalldaten der Jahre 2001 bis 2003 ausgewertet. Zwar sind die Zahlen wie bereits angemerkt nicht direkt vergleichbar, da Robatsch/Nussbaumer nicht alle, sondern nur Unfälle mit Personenschaden berücksichtigen, doch die Verteilung der Unfalltypen ist ähnlich, wie in Tabelle 11 zu sehen.

Tabelle 11: Unfalltypen im Tunnel und auf freier Strecke, Österreich 2001-2003¹⁴⁸

Unfalltyp:	Total		Freie Strecke		Tunnel*	
	abs.	%	abs.	%	abs.	%
Alleinunfälle	3.262	40	3.202	40	60	27
Richtungsunfälle	4.465	54	4.344	55	121	55
Begegnungsverkehr	229	3	191	2	38	17
Sonstige Typen	241	3	239	3	2	1
Gesamt	8.197	100	7.976	100	221	100

* 20 Tunnel mit Gegen-, 119 mit Richtungsverkehr

Der häufigste Unfalltyp ist auch hier der Unfall im Längsverkehr, wobei Robatsch/Nussbaumer unter der Bezeichnung Richtungsunfälle auch die bei Salvisberg et al. Vorbeifahrunfall genannten Unfälle einbeziehen. Diese beiden Unfalltypen haben nach Salvisberg et al. einen Anteil von 54 % an allen Unfällen, nach Robatsch/Nussbaumer beträgt der Anteil 55 % aller Unfälle mit Personenschaden. Verallgemeinert lässt sich also sagen, dass in beiden Studien Kollisionen mit dem Längsverkehr und darunter die Auffahrunfälle mit Fahrzeugen im eigenen Fahrstreifen am häufigsten vorkommen.

Der zweithäufigste Unfalltyp ist laut Robatsch/Nussbaumer ebenfalls der Alleinunfall bzw. Fahrunfall. Sein Anteil beträgt 27 % im Vergleich zu 34 % bei Salvisberg et al. Der etwas höhere Anteil bei Salvisberg ist auf die Einbeziehung aller Unfälle zurückzuführen.

¹⁴⁷ Salvisberg, U.; Allenbach, R.; Cavegn, M. et al.: Verkehrssicherheit in Autobahn- und Autostrassentunneln des Nationalstrassennetzes - bfu-Report Nr. 51/2004. Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung (bfu), Bern, 2004, S. 13.

¹⁴⁸ Robatsch, K.; Nussbaumer, C.: Sicherheitsvergleich von Tunnels - Verkehrssicherheitsvergleich von Tunnels mit Gegenverkehr und Tunnels mit Richtungsverkehr mit anderen Straßenarten. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg.): Schriftenreihe Straßenforschung Heft 552, Wien, 2005, S. 10.

3.4. Unfallursachen

In Kapitel 3.2 wurden sowohl auf den Menschen bezogene als auch bauliche Einflussgrößen auf die Unfallwahrscheinlichkeit in einem Straßentunnel dargestellt. Ein wichtiger Parameter ist dabei die Verkehrsbelastung auf dem betreffenden Streckenabschnitt. Gerade im Bereich der Alpentunnel ist seit Jahren eine Zunahme der Verkehrsbelastung zu beobachten. Im Mont Blanc-Tunnel bspw. hat sich die tägliche Verkehrsbelastung seit seiner Eröffnung 1965 verdoppelt, wobei jedoch der Lkw-Verkehr weit überproportional um das 17-fache angestiegen ist. Diese hohe Belastung stellt eine wesentliche Unfallursache dar.¹⁴⁹ Im Mittelpunkt dieser Arbeit stehen jedoch diejenigen Unfallursachen, die sich auf den Fahrer zurückführen lassen. Eine Reihe von Untersuchungen zeigen, dass das Verhalten der Fahrer in den meisten Fällen ursächlich für einen Unfall ist:

- „Human error is the main reason for accidents in tunnels.“¹⁵⁰
- „Eine Gefahr in Autotunneln geht in Deutschland am ehesten von den Fahrern aus.“¹⁵¹
- „Give that human error is the main cause of accidents, the Group recommended that measures addressed at road users be implemented on a priority basis.“¹⁵²
- „Incorrect behaviour of road users is the main cause of most accidents.“¹⁵³

3.4.1. Verteilung der Unfallursachen

Tabelle 12 zeigt die Auswertung der Unfallursachen nach Salvisberg et al. für das Jahr 2002. Die Auswertung basiert auf den polizeilichen Protokollen von 7.527 Unfällen auf freier Strecke und 570 Unfällen in Tunneln auf Nationalstraßen. Pro Unfall konnten mehrere Ursachen angegeben werden. Der Vergleich der Daten zeigt für Tunnel einen um 3 % höheren Anteil für die Ursache Unaufmerksamkeit als auf freier Strecke. Dies könnte auf den Einfluss der monotonen, informationsarmen Umgebung zurückzuführen sein, wie in Kapitel 3.2.1 geschildert. Die These, dass diese Art der Umgebung sicherheitsfördernd sei, kann somit in Zweifel gezogen werden. Es bestätigt sich dagegen, dass die äußere Einflüsse im Tunnel eine geringere Rolle spielen als auf freier Strecke, was sich in den Anteilen von 1 % im Vergleich zu 6 % widerspiegelt. Der geringere Anteil, den die Geschwindigkeit als Unfallursache im Tunnel einnimmt, 17 % statt 26 % auf freier Strecke, könnte damit erklärt werden, dass die Höchstgeschwindigkeit im Tunnel auf 80 bzw. 100 km/h begrenzt ist.

¹⁴⁹ Tetzner, D.: Sicherheit in Europas Straßentunneln. 3. Internationaler Fachkongress Verkehr und Sicherheit in Straßentunneln, 18.-20. Mai 2005 in Hamburg, S. 2.

¹⁵⁰ European Tunnel Assessment Programme: Tunnel Audit - Final Report. München, 2007, S. 134.

¹⁵¹ N. N.: Sicher durch den Tunnel? Weitere Sicherheitsmaßnahmen gefordert. In: DVR report - Fachmagazin für Verkehrssicherheit Nr. 4/2001, Bonn, 2001, S. 7.

¹⁵² Pesut, A.; Smith, C.: Activities of the United Nations Economic Commission for Europe to Promote Safety in Tunnels. In: Routes/Roads Nr. 324, World Road Association, 2004, S. 84.

¹⁵³ United Nations Economic Commission for Europe, Inland Transport Committee: Recommendations of the Group of Experts on Safety in Road Tunnels - UNECE-Report TRANS/AC.7/9. 2001, S. 9.

Tabelle 12: Mögliche Mängel und Einflüsse auf das Unfallgeschehen, Schweiz 2002¹⁵⁴

Mängel/Einflüsse	Total		Freie Strecke		Tunnel	
	abs.	%	abs.	%	abs.	%
Direkter Einfluss des Lenkers	5.149	39	4.759	39	390	41
- Zustand der Person	1.547	12	1.463	12	84	9
- Mangelhafte Bedienung des Fahrzeugs	608	5	565	5	43	5
- Unaufmerksamkeit	2.663	20	2.442	20	221	23
- Anderer Einfluss des Lenkers	331	2	289	2	42	4
Äußerer Einfluss	807	6	792	6	15	1
Mängel am Fahrzeug	229	2	218	2	11	1
Verkehrsablauf/ Verkehrsregeln	6.919	52	6.382	52	537	56
- Geschwindigkeit	3.410	25	3.243	26	167	17
- Einspuren	1.163	9	1.054	9	109	11
- Überholen	382	3	357	3	25	3
- Abstandsverhalten	1701	13	1.475	12	226	24
- Andere	263	2	253	2	10	1
Unbekannt	150	1	141	1	9	1
Total	13.254	100	12.292	100	962	100

Wie im vorangegangenen Kapitel gezeigt, sind nach Salvisberg 42 % der Unfälle in Tunnel Auffahrunfälle, während ihr Anteil auf freier Strecke nur 23 % beträgt. Diese Beobachtung deckt sich mit den hier aufgeführten Unfallursachen, da das Abstandsverhalten im Tunnel zu 24 % als Unfallursache genannt wurde, auf freier Strecke dagegen nur in 12 % der betrachteten Fälle. Abbildung 6 illustriert die genannten Zahlen.

¹⁵⁴ Salvisberg, U.; Allenbach, R.; Cavegn, M. et al.: Verkehrssicherheit in Autobahn- und Autostrassentunneln des Nationalstrassennetzes - bfu-Report Nr. 51/2004. Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung (bfu), Bern, 2004, S. 14.

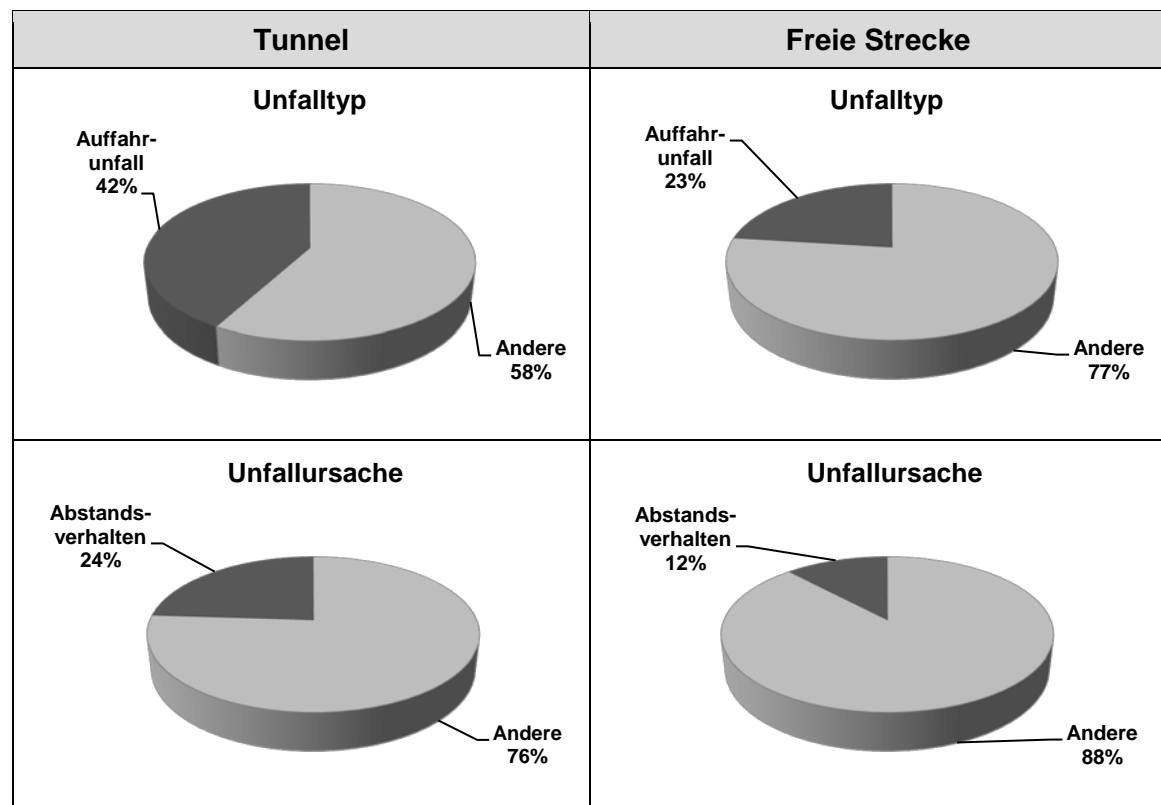


Abbildung 6: Unfalltypen und -ursachen im Tunnel und auf freier Strecke¹⁵⁵

Die Auswertung Österreichischer Tunnelunfälle mit Personenschäden durch Robatsch/Nussbaumer kommt in Bezug auf die Unfallursachen auf ein ähnliches Ergebnis wie Salvisberg et al, siehe Tabelle 13. Ausgewertet wurden 418 Unfälle in Tunneln mit Personenschaden, wobei jeweils mehrere Ursachen genannt werden konnten.

Am häufigsten wurde Unaufmerksamkeit mit einem Anteil von 21 %¹⁵⁶ genannt, gefolgt von Nichteinhaltung des Sicherheitsabstands, 17 %. Fehleinschätzung eines vorausfahrenden oder eines stehenden Fahrzeugs nehmen zusammen einen Anteil von 15 % ein. Nicht angepasste oder überhöhte Geschwindigkeit hat dagegen nur einen Anteil von 6 %.¹⁵⁷ Beide Studien zeigen, dass Fahrzeugmängel kaum eine Rolle spielen.^{158,159}

¹⁵⁵ Eigene Darstellung der in Salvisberg et al. angegebenen Daten, vgl. Tabelle 12.

¹⁵⁶ Pro Unfall konnten mehrere Ursachen genannt werden.

¹⁵⁷ Robatsch, K.; Nussbaumer, C.: Sicherheitsvergleich von Tunnels - Verkehrssicherheitsvergleich von Tunnels mit Gegenverkehr und Tunnels mit Richtungsverkehr mit anderen Straßenarten. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg.): Schriftenreihe Straßenforschung Heft 552, Wien, 2005, S. 28.

¹⁵⁸ Salvisberg, U.; Allenbach, R.; Cavegn, M. et al.: Verkehrssicherheit in Autobahn- und Autostrassentunneln des Nationalstrassennetzes - bfu-Report Nr. 51/2004. Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung (bfu), Bern, 2004, S. 14.

¹⁵⁹ Robatsch, K.; Nussbaumer, C., a. a. O., S. 28.

Tabelle 13: Ursachen von Unfällen mit Personenschaden in Tunneln, Österreich 1999-2003¹⁶⁰

Unfallursache (Mehrfachnennung pro Unfall)	Tunnel	
	abs.	%
Fehlverhalten des Lenkers	235	31,3
- geringer Sicherheitsabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug	128	17,1
- falsches Überholen	25	3,3
- ungenügendes Rechtsfahren	20	2,7
- Sonstiges	62	8,2
Fehleinschätzung	175	23,3
- der Straßenführung	2	0,3
- eines vorausfahrenden Fahrzeugs	38	5
- eines stehenden Fahrzeugs	72	9,6
- Witterung	48	6,4
- Sonstiges	15	2
Mangelnde Wachsamkeit (Vigilanz)	238	31,7
- Übermüdung, Einschlafen	46	6,1
- Blendung	4	0,5
- Ablenkung	22	2,9
- Unaufmerksamkeit	158	21,1
- Medizinische Ursache (Medikamente, Herzinfarkt, Kreislauf etc.)	8	1,1
Geschwindigkeit	61	8,1
- nicht angepasste Geschwindigkeit (Witterung, Straßenzustand etc.)	49	6,5
- Überschreitung Geschwindigkeitslimit	12	1,6
- Sonstiges	0	0
Unvorhergesehene Ereignisse	18	2,5
Technische Mängel	23	3,1
Summe	750	-

3.4.2. Unfallbeteiligte und -verursacher

In beiden Studien wurden die vorliegenden Unfalldaten auch danach ausgewertet, welche Fahrzeuge an Unfällen in Tunneln bzw. auf freier Strecke beteiligt sind. Laut Salvisberg et al. waren im Jahr 2002 Pkw an rund 85 % aller Unfälle beteiligt und Lkw an 12 %. Im Tunnel ist der Anteil der Lkw mit 14 % etwas höher.¹⁶¹ Neben der reinen Beteiligung sind Robatsch/Nussbaumer der Frage des Verschuldens nachgegangen. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass zwischen 1999 und 2003 80 % der Unfälle mit Personenschaden in Tunneln von Pkw verursacht wurden. Der Anteil der Lkw betrug 16 %, der Rest entfiel

¹⁶⁰ Robatsch, K.; Nussbaumer, C.: Sicherheitsvergleich von Tunneln - Verkehrssicherheitsvergleich von Tunneln mit Gegenverkehr und Tunneln mit Richtungsverkehr mit anderen Straßenarten. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg.): Schriftenreihe Straßenforschung Heft 552, Wien, 2005, S. 28.

¹⁶¹ Salvisberg, U.; Allenbach, R.; Cavegn, M. et al.: Verkehrssicherheit in Autobahn- und Autostrassentunneln des Nationalstrassennetzes - bfu-Report Nr. 51/2004. Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung (bfu), Bern, 2004, S. 11.

auf sonstige Fahrzeuge. Eine Auswertung, die auch die unterschiedlichen Unfalltypen berücksichtigt, zeigt, dass Lkw nur etwa 7 % der Alleinunfälle verschulden, 19 % der Auffahrunfälle und im Vergleich zu ihrem Anteil am DTV mit 28 % überdurchschnittlich oft für Begegnungsunfälle verantwortlich sind. Der Grund hierfür liegt vermutlich im größeren Platzbedarf der Lkw, der vor allem in Tunneln mit Gegenverkehr zu einem größeren Unfallrisiko führt.¹⁶²

3.5. Fazit zum Unfallgeschehen in Straßentunneln

Die Gefahr, im Tunnel einen Unfall zu erleiden ist geringer als auf Autobahnen und Landstraßen, doch die Gefahr, dabei ums Leben zu kommen, ist größer. Dies ist auf die baulichen Besonderheiten im Vergleich zur freien Strecke zurückzuführen. Zwar haben diese Besonderheiten sowohl positive als auch negative Effekte, schlussendlich überwiegen aber die negativen, wie z. B. das eingeschränkte Raumangebot einschließlich der psychischen Belastung, die dies bei einigen Fahrern verursacht.

Die häufigsten Unfalltypen im Tunnel sind Auffahr- und Alleinunfall. Ihr Anteil beträgt laut Salvisberg et al. 42 bzw. 34 %. Robatsch/Nussbaumer unterscheiden in Bezug auf die Auffahrunfällen nicht, ob es sich um eine Kollision mit einem Fahrzeug im eigenen Fahrstreifen handelte oder mit einem, das seitlich vorbeifuhr. Unter der Annahme, dass der Anteil der sog. „Vorbeifahrunfälle“ in Österreich ebenso hoch ist wie in der Schweiz (12 %), ergeben sich mit 43 bzw. 27 % für Auffahr- bzw. Alleinunfall vergleichbare Werte. Die Hauptursache der Unfälle ist Unaufmerksamkeit der Fahrer, gefolgt vom Abstandsverhalten, das im Tunnel häufiger als Unfallursache genannt wird als auf freier Strecke. Großen Einfluss auf das Unfall- sowie das Verunfalltenrisiko hat die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV), deren Zunahme mit einer überproportionalen Erhöhung der beiden Risiken einhergeht. Der Anteil der Lkw am DTV hat dagegen keinen Einfluss auf das Unfallrisiko, führt aber zu einer Erhöhung des Verunfalltenrisikos, da Unfälle, an denen Lkw beteiligt sind, aufgrund der größeren Masse schwerwiegendere Konsequenzen haben können.

¹⁶² Robatsch, K.; Nussbaumer, C.: Sicherheitsvergleich von Tunneln - Verkehrssicherheitsvergleich von Tunneln mit Gegenverkehr und Tunneln mit Richtungsverkehr mit anderen Straßenarten. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg.): Schriftenreihe Straßenforschung Heft 552, Wien, 2005, S. 26.

4. Unfallvermeidung in Straßentunneln

In diesem Kapitel erfolgt auf Basis der bisher erläuterten Grundlagen eine Auswahl von Systemen zur Unfallvermeidung in Straßentunneln für die spätere Analyse.

4.1. Abgrenzung des Untersuchungsgegenstands

4.1.1. Unfalltypen

Das Ziel dieser Arbeit liegt darin, Systeme zur Unfallvermeidung in Straßentunneln aus gesellschaftlicher und Stakeholder-Perspektive zu bewerten. In Rahmen der Kosten-Wirksamkeitsanalyse wird als Wirksamkeitsindikator die Vermeidung von Getöteten verwendet (siehe Kapitel 5.2.2). Die Analyse wird dabei auf das Unfallgeschehen in Österreich sowie die beiden häufigsten Unfalltypen beschränkt, d. h. Auffahr- und Alleinunfälle.

4.1.2. Unfallursachen

Detaillierte Unfallanalysen zeigen, dass es in der Regel nicht eine einzige Ursache für die Entstehung eines Unfalls gibt, sondern dass mehrere Einflussfaktoren zusammenwirken. Böhm et al.¹⁶³ unterscheiden beispielsweise Hauptursachen und Hintergrundbedingungen, Shinar et al.¹⁶⁴ direkte und indirekte Unfallursachen. Diese Modelle liefern Beschreibungen von möglichen Fehlern, die in konkreten Situationen gemacht werden und zu Unfällen führen. Sie liefern aber keinen Aufschluss darüber, warum diese Fehler aufgetreten sind, da ihnen kein Modell des menschlichen Handelns zugrunde liegt. Solche handlungstheoretischen Modelle, z. B. nach Wickens, Rasmussen oder Reason, sind abstrakter formuliert und basieren auf der Informationsverarbeitung des Menschen.¹⁶⁵

Die Klassifizierung der Tunnelunfälle nach Robatsch/Nussbaumer erfolgt anhand der Kategorien der amtlichen Unfallstatistik. Zwar können pro Unfall mehrere Ursachen angegeben werden, doch ein psychologisches Fehlerklassifikationssystem auf Basis des

¹⁶³ Böhm, H.; Schneider, W.: Verkehrsteilnehmergruppen und Verkehrserziehungsmittel. Forschungsgemeinschaft "Der Mensch im Verkehr", Köln, 1965. Nach: Gründl, M.: Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotential und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen. Dissertation, Universität Regensburg, 2005, S. 66ff.

¹⁶⁴ Shinar, D.; McDonald, S. T.; Treat, J. R.: The interaction between driver mental and physical conditions and errors causing traffic accidents: An analytical approach. In: Journal of Safety Research 1, Nr. 10, 1978. S. 16-23. Nach: Gründl, M.: Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotential und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen. Dissertation, Universität Regensburg, 2005, S. 70ff.

¹⁶⁵ Wickens, C.: Engineering psychology and human performance. HarperCollins, New York, 1992; Rasmussen, J.: Human errors: A taxonomy for describing human malfunction in industrial installations. In: Journal of Occupational Accidents Nr. 4, 1982. S. 311-333; Reason, J.: Human error. Cambridge University Press, New York, 1990. Nach: Gründl, M.: Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotential und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen. Dissertation, Universität Regensburg, 2005, 80-93.

menschlichen Informationsverarbeitungsprozesses wurde nicht zur Analyse herangezogen. Es kann daher nur eine Aussage darüber getroffen werden, bei wie vielen Unfällen ein zu geringer Sicherheitsabstand eine der Ursachen war, doch warum die betreffenden Fahrer zu dicht auffuhren – z. B. versehentlich, aus einer aggressiven Grundhaltung heraus oder aus Selbstüberschätzung – wird nicht ersichtlich und kann auf Basis des vorhandenen Datenmaterials nicht ermittelt werden.

Zwar wird in der Analyse von Robatsch/Nussbaumer auch Unaufmerksamkeit als eine der möglichen Unfallursachen ausgeführt, doch die eigentliche Ursache für ihr Auftreten ist in einem mentalen Prozess begründet und kann sich z. B. durch Überforderung oder Unterforderung zeigen, was anhand des Datenmaterials nicht zu bestimmen ist.

Für die Analyse werden daher die folgenden Annahmen getroffen: Die beiden betrachteten Unfalltypen werden jeweils durch eine einzige zugeordnete Primärursache verursacht, Sekundärursachen werden vernachlässigt. Im Fall der Auffahrunfälle ist dies ein zu geringer Sicherheitsabstand, bei den Alleinunfällen ein Überschreiten der zulässigen Geschwindigkeit. Die zugrunde liegende Fehlhandlung des Fahrers, Unaufmerksamkeit oder absichtlicher Verstoß, bleibt dabei unberücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass durch Systeme, die den Fahrer bei der Einhaltung von Abstand und Geschwindigkeit unterstützen, diese Unfalltypen vermieden werden können.

Das Wirkungsfeld¹⁶⁶, siehe Formel (6), ist damit gleich dem Anteil des Unfalltyps an allen Tunnelunfällen.

$$\text{Wirkungsfeld} = \frac{\text{Unfälle mit möglicher Systemwirkung}}{\text{alle Unfälle}} * 100\% \quad (6)$$

Diese Vorgehensweise stellt eine Vereinfachung dar, ist in Untersuchungen zur Abschätzung des Sicherheitspotenzials von Fahrerassistenzsystemen jedoch üblich. Verkehrssicherheit und Unfallgeschehen hängen von einem komplexen Zusammenwirken einer Vielzahl von Faktoren ab und die Rückführung eines Unfallgeschehens auf eine Primärursache kann dem keine Rechnung tragen. Dieser Ansatz hat aber den Vorteil, praktikabel zu sein und eine Wirkungsabschätzung zu ermöglichen. Aufwändigere Verfahren, die mehrere Einflussgrößen berücksichtigen, können der Literatur entnommen werden.¹⁶⁷

4.1.3. Unfallbeteiligte

Unfällen in Straßentunneln werden überwiegend von Pkw verursacht und es sind in der Mehrzahl der Fälle ausschließlich Pkw an den Unfällen beteiligt. Eine besondere Gefahr geht jedoch von Gefahrguttransporten aus, für die wegen der potentiell schwerwiegenden Unfallfolgen strenge Auflagen gelten.

¹⁶⁶ Hannawald, L.: Multivariate Bewertung zukünftiger Fahrzeugsicherheit. VDI Reihe 12 Nr. 682. VDI, Düsseldorf, 2008, S. 14.

¹⁶⁷ Abele, J.; Kerlen, C.; Krüger, S. et al.: SEISS: Exploratory Study on the Potential Socio-economic Impact of the Introduction of Intelligent Safety Systems in Road Vehicles. Teltow, 2005, S. 13. Oder Yamamura, Y.; Seto, Y.: A Study on String-stable ACC Using Vehicle-to-Vehicle Communication. In: Society of Automotive Engineers (Hrsg.): Intelligent Vehicles & Transportation Systems. SAE International, Warrendale, 2006.

Der Anteil des Gefahrguts an allen Transporten wird je nach Studie auf 1,5 bzw. 1,9 % der Gütertransporte geschätzt,¹⁶⁸ was nur 0,4 bzw. 0,1 % des Gesamtverkehrs entspricht. Durch diesen geringen Anteil ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein solches Fahrzeug an einem Unfall beteiligt ist, ebenfalls gering. In einer Risikoanalyse, die mit dem niederländischen TunPrim-Modell für ein Tunnel-Neubauprojekt durchgeführt wurde, wurde ermittelt, welchen Einfluss eine Verdoppelung des Anteils der Gefahrguttransporte auf das Unfallrisiko hat. Der Erwartungswert des individuellen Sterberisikos pro Kilometer blieb durch die Verdopplung nahezu unverändert. Das gesellschaftliche Risiko, dargestellt als Häufigkeit von Unfallszenarien mit geringer Wahrscheinlichkeit bei hoher Zahl von Getöteten und Verletzten, nahm leicht zu, blieb allerdings unterhalb einer zuvor definierten kritischen Risikoschwelle.¹⁶⁹

Die Studie zeigte, dass „normale“ Unfälle, d. h. Pkw-Unfälle ohne Beteiligung eines Gefahrguttransporters, ausschlaggebend für die Verkehrssicherheit von Straßentunneln sind.¹⁷⁰ Auf eine gesonderte Betrachtung von Lkw wird daher im Rahmen dieser Arbeit verzichtet, ebenso im Hinblick auf Reisebusse, da ihr Anteil am Verkehr üblicherweise gering ist. Durchschnittswerte liegen je nach Modell bei Anteilen von 0,4 bis 1,25 %¹⁷¹ am Gesamtverkehr.

4.1.4. Tunnelcharakteristika

Straßentunnel können anhand einer Reihe sicherheitsrelevanter Parameter differenziert werden, darunter z. B. Länge, durchschnittlicher täglicher Verkehr und Betriebsart. Allein anhand dieser drei Parameter werden in der EU-Richtlinie über die Mindestanforderungen an die Sicherheit von Straßentunneln zehn unterschiedliche Tunneltypen definiert, für die jeweils spezifische Mindestanforderungen an die Sicherheitseinrichtungen festgelegt werden.¹⁷²

¹⁶⁸ Goncalves, N.; Guarascio, M.; Hall, R. et al.: Risk Analysis for Road Tunnels - PIARC Report 2008R02. PIARC Technical Committee Road Tunnel Operation (C3.3), Défense Cedex, 2008, S. 157: Österreichisches Modell (1,5 %); S. 239: OECD/PIARC-Modell (1,9 %).

¹⁶⁹ Ergänzung: Angesichts der Erhöhung des gesellschaftlichen Risikos durch eine Verdopplung der Gefahrguttransporte stellt sich die Frage, ob die Nutzung von Straßentunneln ab einer gewissen Länge für Gefahrguttransporte verboten werden sollte. Dies wurde in einer britischen Studie unter Einsatz des OECD/PIARC Dangerous Goods Quantitative Risk Assessment Modells untersucht. Berechnet wurde der Erwartungswert des gesellschaftlichen Risikos für die Fälle a) Gefahrguttransporte nutzen den exemplarischen Tunnel und b) Gefahrguttransporte werden über eine längere Alternativroute ohne Tunnel umgeleitet. Die Berechnungen ergaben, dass sich die Gesamtrisiken für die beiden betrachteten Fälle nicht signifikant unterscheiden, sofern der Tunnel im Richtungsverkehr betrieben wird. Bei Gegenverkehr ergibt sich ein geringfügiger Vorteil für die Umleitungsstrecke. Siehe Goncalves, N.; Guarascio, M.; Hall, R. et al.: Risk Analysis for Road Tunnels - PIARC Report 2008R02. PIARC Technical Committee Road Tunnel Operation (C3.3), Défense Cedex, 2008, S. 237-245.

¹⁷⁰ Goncalves, N.; Guarascio, M.; Hall, R. et al., a. a. O., S. 199-207.

¹⁷¹ Siehe Goncalves, N.; Guarascio, M.; Hall, R. et al., a. a. O., S. 159: Österreichisches Modell; S. 239: OECD/PIARC-Modell.

¹⁷² N. N.: Richtlinie 2004/54/EG des europäischen Parlaments und des Rates über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz. In: Amtsblatt der Europäischen Union vom 30. April 2004. S. 73-75.

Eine gesonderte Betrachtung dieser Kategorien ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, da die Studie von Robatsch/Nussbaumer nicht über Daten dieses Detaillierungsgrades verfügt. Basis für die Berechnungen sind daher die Tunnel, die in der Unfallanalyse von Robatsch/Nussbaumer berücksichtigt wurden, siehe Anhang A1.1.

4.2. Systemauswahl

4.2.1. Assistenzkonzepte

Das Verkehrssystem Straßentunnel besteht zum einen aus dem Tunnel selbst als Teil der Verkehrsinfrastruktur, zum anderen aus seiner Betriebsorganisation sowie den Fahrzeugen und Nutzern, die ihn durchfahren.¹⁷³ Die Erhöhung der Verkehrssicherheit, in diesem Fall die Vermeidung von Auffahr- und Alleinunfällen, kann auf verschiedene Weisen erlangt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Ziel verfolgt, Wirksamkeit und Akzeptanz von rein tunnelbasierten bzw. kooperativen Systemen zu vergleichen. Es wird dabei angenommen, dass kooperative Systeme Vorteile gegenüber reinen Tunnel-Lösungen haben.

Betrachtet man zunächst den Tunnel allein, so zeigt sich, dass ein Tunnel in der Regel über eine Reihe von Sicherheitseinrichtungen verfügt, die für die Umsetzung unfallvermeidender Maßnahmen genutzt werden können. In erster Linie ist die Leitzentrale zu nennen, die Betrieb und Zustand des Tunnels überwacht.¹⁷⁴ Bei größeren Tunneln ist die Leitzentrale an sieben Tagen pro Woche rund um die Uhr besetzt. Das dort eingesetzte Personal leitet bei Vorfällen die entsprechenden Maßnahmen ein, die von der Anpassung der Wechselbeschilderung bis zur Sperrung des Tunnels reichen können.¹⁷⁵ Des Weiteren ist ein System zur Verkehrsüberwachung vorhanden, das mittels Videokameras und automatischer Bildauswertung Verkehrsstörungen wie z. B. stehen gebliebene Fahrzeuge erkennen kann.^{176,177} Diese Incident Detection Systems überwachen mittels Closed Circuit Video Equipment (CCVE) kontinuierlich das Verkehrsgeschehen im Tunnel und erfassen Störungen im Verkehrsablauf automatisch. Detektierte Störungen werden über ein Incident Verification System überprüft und anschließend entsprechende Maßnahmen wie z. B. die Angabe einer situationsangepassten Höchstgeschwindigkeit über Wechselverkehrszeichen (VMS, Variable Message Sign, und CMS, Changeable Message Sign¹⁷⁸) in die Wege geleitet.¹⁷⁹ Weitere Anwendungen zur Unfallvermeidung auf Basis der automatischen Systeme zur Detektion und Verifikation von Störungen sind denkbar, da über Radarsensoren in der Wand oder Decke des Tunnels außerdem Geschwindigkeit und Durch-

¹⁷³ N. N.: Richtlinie 2004/54/EG des europäischen Parlaments und des Rates über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz. In: Amtsblatt der Europäischen Union vom 30. April 2004. S. 59.

¹⁷⁴ N. N.: Richtlinie 2004/54/EG, a. a. O., S. 70.

¹⁷⁵ Welte, U.; Rock, T.; Allmirall-Bellido, J. et al.: Traffic Incident Management Systems Used in Road Tunnels. PIARC Technical Committee on Road Tunnel Operation (C5), Défense Cedex, 2004, S. 17.

¹⁷⁶ N. N.: Richtlinie 2004/54/EG, a. a. O., S. 70.

¹⁷⁷ Welte, U.; Rock, T.; Allmirall-Bellido, J. et al., a. a. O., S. 25.

¹⁷⁸ Welte, U.; Rock, T.; Allmirall-Bellido, J. et al., a. a. O., S. 47.

¹⁷⁹ Welte, U.; Rock, T.; Allmirall-Bellido, J. et al., a. a. O., S. 15.

fluss der Fahrzeuge, aber auch Abstände zwischen Fahrzeugen erfasst werden können.¹⁸⁰ Moderne CCVE-Systeme bieten ebenfalls die Möglichkeit, zu dichtes Auffahren von Fahrzeuge zu erkennen.¹⁸¹

In längeren Tunneln mit entsprechendem Verkehrsaufkommen fordert die EU-Richtlinie außerdem das Vorhandensein von Kommunikationssystemen, was zum einen Funkübertragungsanlagen für Einsatzdienste beinhaltet und zum anderen der Leitstelle eine Übertragung von Nachrichten über Rundfunkkanäle direkt ins Fahrzeug ermöglicht.¹⁸² Der Empfang mindestens eines lokalen Radiosenders innerhalb des Tunnels ist vorgeschrieben, und in einem Notfall kann das Personal der Leitzentrale die Übertragung der Radiosender unterbrechen, um entweder aktuelle Hinweise oder vorab aufgezeichnete Anweisungen in die Fahrzeuge zu übertragen. Ein solches System wird als Voice Evacuation System bezeichnet.¹⁸³ Es ermöglicht eine unidirektionale Informationsübermittlung von der Tunnelleitzentrale in die im Tunnel befindlichen Fahrzeuge. Diese Kommunikationseinrichtungen können die Basis für kooperative Sicherheitssysteme bilden.

Sowohl für die Umsetzung in Form eines reinen Tunnelsystems als auch im Hinblick auf kooperative Systeme existieren eine Reihe unterschiedlicher Möglichkeiten. Es ist erforderlich, eine Auswahl zu treffen und für die jeweilige Kombination aus Unfallart und Assistenzkonzept Stellvertreterlösungen zu definieren, die dazu dienen, die gewählte Bewertungsmethodik anzuwenden. Diese lässt sich in anschließenden Arbeiten auf weitere Systeme übertragen.

Kombinationen von mehreren Systemen werden nicht berücksichtigt, da es in solchen Fällen schwierig ist, eine Aussage über das kombinierte Unfallvermeidungspotential zu treffen. Bei einer Bewertung von Systemkombinationen müssen die Wechselwirkungen der Systeme bestimmt werden, um eine verlässliche Aussage über das Sicherheitspotential des Gesamtsystems zu erhalten. Eine einfache Addition der nachgewiesenen Einzelnutzen führt dagegen zu einer systematischen Überschätzung des Gesamtnutzens.^{184, 185}

4.2.2. Auffahrunfall

Ziel eines Systems zur Vermeidung von Auffahrunfällen in Straßentunneln ist, den Fahrer bei der Einhaltung des Sicherheitsabstands zu unterstützen. Der in der EU-Tunnel-Richtlinie geforderte Mindestabstand entspricht der innerhalb von 2 Sekunden zurückge-

¹⁸⁰ Welte, U.; Rock, T.; Allmirall-Bellido, J. et al.: Traffic Incident Management Systems Used in Road Tunnels. PIARC Technical Committee on Road Tunnel Operation (C5), Défense Cedex, 2004, S. 13.

¹⁸¹ Welte, U.; Rock, T.; Allmirall-Bellido, J. et al., a. a. O., S. 25.

¹⁸² N. N.: Richtlinie 2004/54/EG des europäischen Parlaments und des Rates über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz. In: Amtsblatt der Europäischen Union vom 30. April 2004, S. 71.

¹⁸³ Welte, U.; Rock, T.; Allmirall-Bellido, J. et al., a. a. O., S. 57.

¹⁸⁴ Hannawald, L.: Multivariate Bewertung zukünftiger Fahrzeugsicherheit. VDI Reihe 12 Nr. 682. VDI, Düsseldorf, 2008, S. 94.

¹⁸⁵ Abele, J.; Kerlen, C.; Krüger, S. et al.: SEISS: Exploratory Study on the Potential Socio-economic Impact of the Introduction of Intelligent Safety Systems in Road Vehicles. Teltow, 2005, S. 4.

legten Strecke.¹⁸⁶ Die Angabe des Abstands in Form einer Zeitangabe wird als Zeitlücke τ bezeichnet und ist definiert als Zeitdifferenz, mit der zwei Fahrzeuge einen Ort passieren:

$$\tau = \frac{d}{v} \quad (7)$$

mit d für den Abstand und v für die Fahrgeschwindigkeit.

Systemen, die Auffahrunfälle vermeiden helfen sollen, liegt die grundsätzliche Überlegung zugrunde, dass in kollisionssträchtigen Situationen ein Zeitgewinn einen Sicherheitsgewinn darstellt. Bereits 1979 zeigte Enke, dass eine Vorverlagerung der Fahrerreaktion um 0,5 s die Wahrscheinlichkeit einer Kollision erheblich senkt, je nach den spezifischen Randbedingungen um bis zu 65 %, wie Abbildung 7 auf der folgenden Seite zeigt. Der Wirkmechanismus eines unfallvermeidenden Systems besteht demnach darin, den Zeitpunkt der Reaktion vorzuverlegen.¹⁸⁷

Die Anforderungen an Systeme zur Vermeidung von Auffahrunfällen sind in Tabelle 14 zusammengestellt. Die Abkürzungen stammen aus der Produktentwicklungsmethodik:¹⁸⁸

- Festforderung (FF) – eine Anforderung, die durch einen festen Wert ohne Toleranzbereich ausgedrückt wird.
- Bereichsforderung (BF) – eine Anforderung mit Toleranzbereich. Möglich sind Intervallforderungen (von ... bis ...), Mindest- und Maximalforderungen.
- Zielforderung (ZF) – eine Anforderung, die möglichst gut erfüllt werden soll, für die aber keine genauen Grenzen angegeben werden können.
- Wunsch (W) – eine Anforderung, deren Erfüllung wünschenswert ist, die aber geringere Priorität hat als die anderen genannten Anforderungen.

Tabelle 14: Funktionale Anforderungsliste für ein System zur Vermeidung von Auffahrunfällen

Anforderungsliste Auffahrunfälle				
Bereich	Art	Bezeichnung	Werte	Quelle
Funktion	FF	Detektion des Abstands zwischen Fahrzeugen, während diese den Tunnel durchfahren	ja / nein	Wirkungsfeld
	BF	Warnung des Fahrers bei Unterschreiten des Mindestabstand (Mindestforderung)	Zeitlücke < 2 s	EU-Tunnel-Richtlinie
	W	Eingriff in das Geschehen bei Unterschreiten des Mindestabstands	Zeitlücke < 2 s	EU-Tunnel-Richtlinie

¹⁸⁶ N. N.: Richtlinie 2004/54/EG des europäischen Parlaments und des Rates über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz. In: Amtsblatt der Europäischen Union vom 30. April 2004. S. 71.

¹⁸⁷ Abele, J.; Kerlen, C.; Krüger, S. et al.: SEISS: Exploratory Study on the Potential Socio-economic Impact of the Introduction of Intelligent Safety Systems in Road Vehicles. Teltow, 2005, S. 47.

¹⁸⁸ Birkhofer, H.; Kloberdanz, H.: Produktentwicklung I. Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente, Technische Universität Darmstadt, 2005, S. 2.26-2.27.

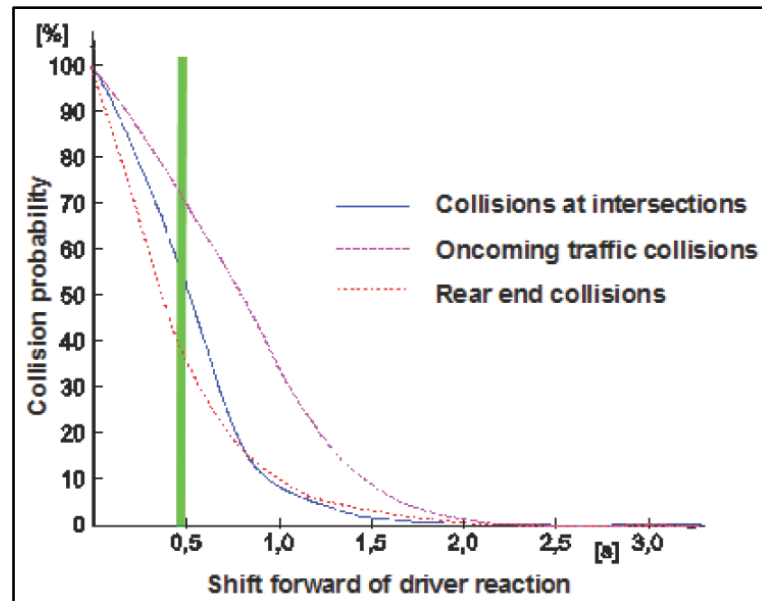


Abbildung 7: Einfluss des Reaktionszeitpunkts auf die Kollisionswahrscheinlichkeit¹⁸⁹

Systeme zur Umsetzung der o. g. Anforderungen sind das Moving Spot Light System als Vertreter des rein infrastrukturbasierten Assistenzkonzepts und die Infrastructure-to-Car-Abstandswarnung (im Folgenden abgekürzt I2C-Abstandswarnung) als kooperatives System. Eine Beschreibung von Aufbau und Funktionsweise folgt in Kapitel 5.3.2 bzw. 5.3.3.

¹⁸⁹ Enke, M.: Collision Probability Related to the Shift Forward of Driver Reaction. 7th International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, 5.-8. Juni 1979 in Washington. Nach: Abele, J.; Kerlen, C.; Krüger, S. et al.: SEISS: Exploratory Study on the Potential Socio-economic Impact of the Introduction of Intelligent Safety Systems in Road Vehicles. Teltow, 2005, S. 47.

4.2.3. Alleinunfall

Der zweithäufigste Unfalltyp in Straßentunneln ist der Alleinunfall, für den als Primärursache eine zu hohe Geschwindigkeit angenommen wird. Dies muss nicht zwangsläufig bedeuten, dass die erlaubte Höchstgeschwindigkeit überschritten wurde, es ist auch möglich, dass die gewählte Geschwindigkeit unterhalb der Höchstgrenze lag, für die betreffende Verkehrssituation jedoch zu hoch war. Letzteres erfordert eine situationsabhängige Bewertung der Fahrgeschwindigkeit, was schwierig zu bewerkstelligen und mit rechtlichen Problemen verbunden ist. Es wird daher im Rahmen dieser Arbeit vereinfachend davon ausgegangen, dass ein Übertreten der vorgegebenen Höchstgeschwindigkeit ursächlich für Alleinunfälle ist. Ziel der betrachteten Systembeispiele ist es daher, den Fahrer bei der Einhaltung der vorgeschriebenen Höchstgeschwindigkeit zu unterstützen.

Die Anforderungen an ein solches System werden in Tabelle 15 dargestellt. Für die weitere Analyse ausgewählt werden das tunnelbasierte System Section Control und Intelligent Speed Adaptation, bei dem Fahrzeug und Tunnel zusammenwirken. Die Systeme werden in den Kapiteln 5.3.2 und 5.3.5 beschrieben.

Tabelle 15: Funktionale Anforderungsliste für ein System zur Vermeidung von Fahrnfällen

Anforderungsliste Fahrnfälle				
Bereich	Art	Bezeichnung	Werte	Quelle
Funktion	FF	Detektion der Geschwindigkeit, mit der sich Fahrzeug fortbewegt	ja / nein	Wirkungsfeld
	BF	Warnung des Fahrers bei Überschreiten der Höchstgeschwindigkeit (Minimalforderung)	$v > v_{max}$	von Tunnel abhängig, meist 80-100 km/h
	W	Eingriff in das Geschehen bei Überschreiten der Höchstgeschwindigkeit	$v > v_{max}$	von Tunnel abhängig, meist 80-100 km/h

4.2.4. Zusammenfassung Systemauswahl

Tabelle 16 fasst die ausgewählten Systeme zusammen und klassifiziert sie.

Tabelle 16: Zusammenfassung der Systembeispiele

System	Wirkungsfeld	Assistenzstrategie	Assistenzkonzept
Moving Spot Light System	Auffahrunfall, 43 %	Warnung	rein infrastrukturbasiert
I2C-Abstandswarnung	Auffahrunfall, 43 %	Warnung	kooperativ
Section Control	Alleinunfall, 27 %	(Sanktion)	rein infrastrukturbasiert
Intelligent Speed Adaptation	Alleinunfall, 27 %	Warnung/Eingriff	kooperativ

5. Sozio-ökonomische Bewertung

Die ausgewählten Systeme zur Vermeidung von Unfällen in Straßentunneln stellen, ihre Umsetzung vorausgesetzt, Investitionen der öffentlichen Hand dar, sei es direkt durch die Installation in einem öffentlich betriebenen Tunnel oder indirekt durch die Förderung von Forschungsprojekten im Bereich der kooperativen Systeme. Ein öffentlicher Entscheidungsträger, der vor der Entscheidung steht, eine Auswahl aus mehreren Alternativen zu treffen, ist verpflichtet, gesamtgesellschaftliche Interessen wahrzunehmen. Das bedeutet, dass bei der Entscheidungsfindung alle relevanten positiven und negativen Wirkungen der Investition zu berücksichtigen sind. Es ist in der Realität nicht anzunehmen, dass eine Maßnahme ausschließlich positive Wirkungen auf alle Betroffenen entfaltet. Auftretende negative Wirkungen müssen daher dem „Gewinn“ gegenübergestellt werden, wobei für beides die gesamtgesellschaftliche Perspektive gilt.¹⁹⁰

Öffentliche Entscheidungsträger sind darüber hinaus durch Art 114 GG sowie § 6 Abs. 1 des Haushaltsgrundsätzegesetzes (HGrG) verpflichtet, den Grundsatz der Wirtschaftlichkeit zu befolgen. Dies bedeutet, dass sie dem Minimal- und Maximalprinzip unterworfen sind und bei einer Auswahl zwischen mehreren Maßnahmen diejenige auswählen müssen, die die günstigste Relation zwischen dem verfolgten Ziel und den erforderlichen Ressourcen aufweist. Aus diesem Grund sind für alle finanzwirksamen Vorhaben der öffentlichen Hand entsprechende Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen durchzuführen.¹⁹¹ Zu berücksichtigen sind dabei alle von den Maßnahmen Betroffenen, worunter Personen, Unternehmen und Institutionen, aber auch die Umwelt als solche fallen.¹⁹²

Aus diesen beiden Ansprüchen ergibt sich zusammen die Notwendigkeit, eine sozio-ökonomische Bewertung der ausgewählten Systeme durchzuführen, in die sowohl die gesellschaftliche als auch die wirtschaftliche Perspektive eingehen. In diesem Kapitel wird die ausgewählte Methode dargestellt. Da über die sozio-ökonomische Bewertung nur die gesellschaftliche Perspektive abgebildet wird, gleichzeitig aber die Akzeptanz der Systeme durch alle Betroffenen entscheidend für deren Erfolg ist, erfolgt im anschließenden Kapitel 6 eine Stakeholder-Analyse, in die die individuellen Ziele und Präferenzen der Betroffenen eingehen.

5.1. Verfahren der Wirtschaftlichkeitsanalyse

Sowohl für die Bewertung technischer Systeme als auch für die Bewertung von Investitionsprojekten existieren eine Reihe von Verfahren und Methoden, über die bspw. Breiing/Knosala¹⁹³ und Adunka¹⁹⁴ einen breiten Überblick liefern. Die grundsätzliche Problemstellung und Vorgehensweise sind dabei dieselben, unabhängig vom konkreten Verfahren:

¹⁹⁰Steierwald, G.: Stadtverkehrsplanung. Springer, Berlin, 2005, S. 356.

¹⁹¹Blanke, B.: Modernes Management für die Verwaltung. Pinkvoss, Hannover, 2005, S. 286.

¹⁹²Steierwald, G., a. a. O., S. 357.

¹⁹³Breiing, A.; Knosala, R.: Bewerten technischer Systeme. Springer, Berlin, 1997.

¹⁹⁴Adunka, R.: Rechnerunterstützter Bewertungsprozess im Umfeld methodischer Produktentwicklung. VDI Reihe 1 Nr. 362. VDI, Düsseldorf, 2003.

Es besteht ein Problem, für das eine Vielzahl möglicher Lösungen zur Verfügung steht. Zur Auswahl der am besten geeigneten Lösung werden Bewertungskriterien aufgestellt und der Erfüllungsgrad dieser Kriterien durch die einzelnen Lösungen bestimmt.¹⁹⁵ Die einzelnen Bewertungsverfahren unterscheiden sich jedoch im Hinblick auf ihre Zielsetzung bzw. ihren Ursprung. Einige von ihnen beschränken sich auf finanzielle Aspekte der Investitionsanalyse, siehe Abbildung 8, links.

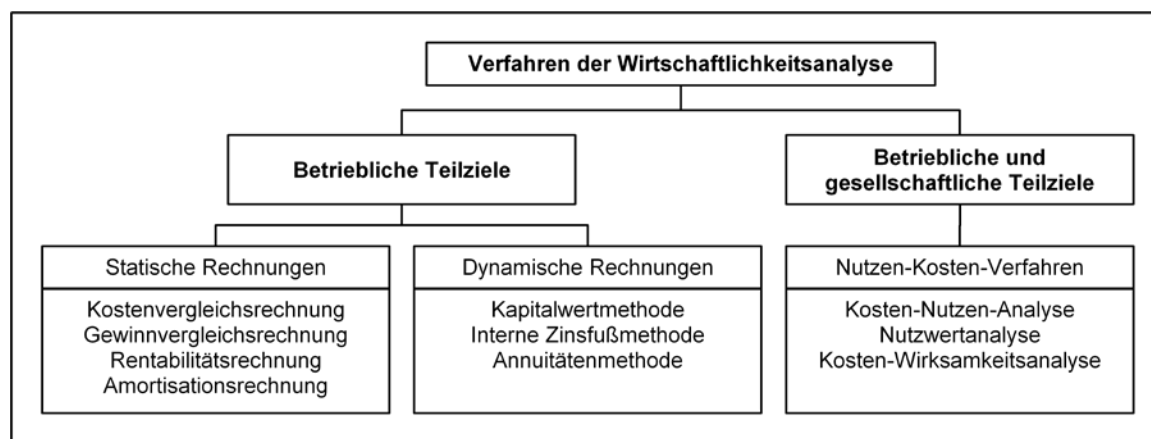


Abbildung 8: Verfahren der Wirtschaftlichkeitsanalyse¹⁹⁶

Die sog. Nutzen-Kosten-Verfahren, in Abbildung 8 rechts zu sehen, bieten im Vergleich zu den rein finanziell ausgerichteten Verfahren den Vorteil, dass neben quantifizierbaren Kosten und Erlösen auch qualitative Nutzenaspekte in die Bewertung einfließen können. Ihre Zielsetzung besteht darin, unter Einbeziehung aller Faktoren, die sich für die Allgemeinheit ergeben, eine Entscheidungsunterstützung zu liefern, die für einen möglichst hohen gesamtgesellschaftlichen Nutzen sorgt. Insbesondere können auch Wirkungen berücksichtigt werden, für die keine Marktpreise existieren wie z. B. Sicherheit oder Umweltfreundlichkeit. Der Ansatz der Nutzen-Kosten-Verfahren ist somit umfassender als der von rein betrieblich orientierten Wirtschaftlichkeitsanalysen.¹⁹⁷

Die Grundlage der *Kosten-Nutzen-Analyse* besteht darin, dass Kosten und Nutzen einer Maßnahme in Form von Geldeinheiten in Beziehung zueinander gesetzt werden. Ist der Nutzen größer als die Kosten, so gilt eine Maßnahme als vorteilhaft, bzw. beim Vergleich mehrerer Alternativen ist diejenige am vorteilhaftesten, die das günstigste Verhältnis aufweist. Hierfür ist es erforderlich, dass alle Nutzenaspekte in Geldeinheiten transformiert werden und schließlich der Gesamtwert einer Alternative in Form eines Geldwertes ausgewiesen wird. Dies kann Probleme mit sich bringen, da bei intangiblen Gütern bzw. Effekten, für die kein Marktpreis existiert, Annahmen und Modelle zurate gezogen werden, die fiktive Preise ergeben und z. T. als fragwürdig angesehen werden können.¹⁹⁸ Dies ist vor allem dann problematisch, wenn der Wert eines Menschenlebens in Geldeinheiten ausgedrückt werden soll, wie es im Rahmen dieser Arbeit erforderlich wäre. Soll

¹⁹⁵ Adunka, R.: Rechnerunterstützter Bewertungsprozess im Umfeld methodischer Produktentwicklung. VDI Reihe 1 Nr. 362. VDI, Düsseldorf, 2003, S. 7.

¹⁹⁶ Vgl. Klümper, B.; Möllers, H.; Zimmermann, E.: Kommunale Kosten- und Wirtschaftlichkeitsrechnung. Bernhard-Witten, Witten, 2006, S. 339.

¹⁹⁷ Klümper, B.; Möllers, H.; Zimmermann, E., a. a. O., S. 461.

¹⁹⁸ Klümper, B.; Möllers, H.; Zimmermann, E., a. a. O., S. 468.

der Nutzen der Maßnahmen im Rahmen einer Kosten-Nutzen-Analyse bewertet werden, so ist die Festlegung eines Geldwerts pro (vermiedenen) Todesfall unvermeidlich. Neben den ethischen Problemen, die dies mit sich bringt, stellen sich ganz praktische Fragen, wie ein solcher Wert zu ermitteln ist. In der Literatur existieren hierfür unterschiedliche Bewertungskonzepte, die in Abbildung 9 aufgeführt sind.

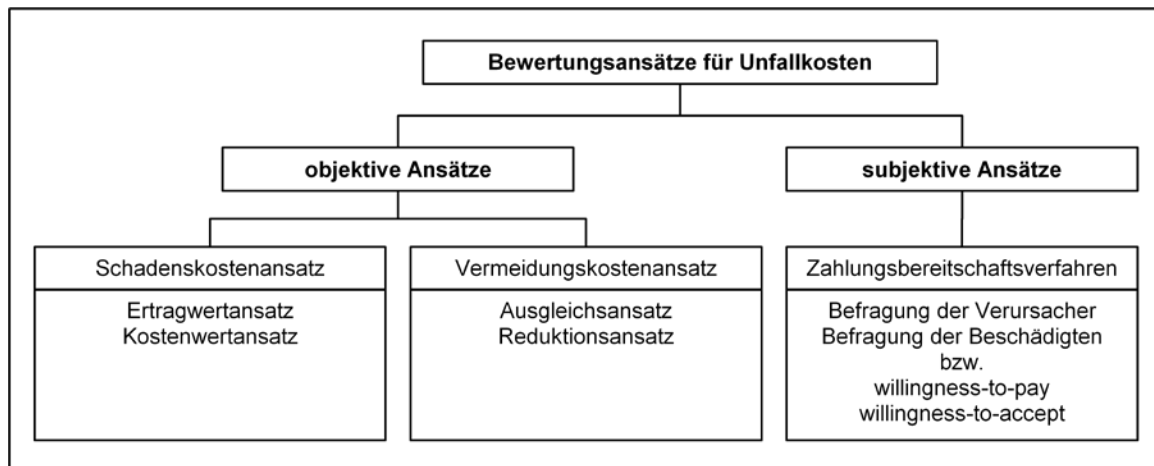


Abbildung 9: Methoden zur Berechnung von Unfallkosten¹⁹⁹

In Deutschland werden die volkswirtschaftlichen Kosten von Verkehrsunfällen u. a. durch die BASt berechnet, die dabei den Schadenskostenansatz verfolgt. Nach dieser Methode, die auch als Humankapital-Ansatz bezeichnet wird, bedeutet der vorzeitige Tod einer erwerbstätigen Person einen volkswirtschaftlichen Produktivitätsverlust, der sich in Geldeinheiten ausdrücken lässt. Kritiker werfen jedoch ein, dass bei Anwendung des Humankapital-Ansatzes Erwerbstätige gegenüber anderen Mitgliedern der Gesellschaft, z. B. Kindern, Studenten oder Arbeitslosen, bevorzugt werden und bei strenger Auslegung der Wert eines Erwerbstätigen umso höher sein müsste, je höher sein Einkommen ist.^{200,201,202} Trotz dieser Kritik und ethisch-moralischer Bedenken²⁰³ existieren solche Geldwerte für Getötete oder Schwerverletzte und werden zur Berechnung volkswirtschaftlicher Schäden oder der Höhe von Schadensersatzleistungen eingesetzt. Die in Tabelle 17 aufgeführten Werte aus unterschiedlichen Staaten zeigen jedoch, dass diese Zahlenwerte trotz der ihnen zugrunde liegenden Modelle relativ willkürlich sind, da sie eine große, ohne Kenntnis der Berechnungsdetails nicht nachvollziehbare Bandbreite umfassen.

¹⁹⁹ Eigene Darstellung nach: Baum, H.; Höhnscheid, K.: Volkswirtschaftliche Kosten der Personenschäden im Straßenverkehr. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Heft M 102. Wirtschaftsverlag NW, Bergisch-Glatbach, 1999, S. 8.

²⁰⁰ Greiner, W.: Die Berechnung von Kosten und Nutzen. In: Schöffski, O.; Graf von der Schulenburg, J. (Hrsg.): Gesundheitsökonomische Evaluationen. Berlin: Springer, 2008, S. 55-56.

²⁰¹ Baum, H.; Höhnscheid, K.: Volkswirtschaftliche Kosten der Personenschäden im Straßenverkehr. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Heft M 102. Wirtschaftsverlag NW, Bergisch-Glatbach, 1999, S. 9.

²⁰² Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): ROSEBUD: Road Safety and Environmental Benefit-Cost and Cost-Effectiveness Analysis for Use in Decision-Making. Report "State of the Art". Deliverable D2, 2003, S. 198.

²⁰³ „Das menschliche Leben hat einen Wert und keinen Preis: das ist unser ethisches Credo“, Kersting, W.: Gerechtigkeitsethische Überlegungen zur Gesundheitsvorsorge. In: Schöffski, O.; Graf von der Schulenburg, J. (Hrsg.): Gesundheitsökonomische Evaluationen. Berlin: Springer, 2008. S. 41.

Tabelle 17: Kostensätze für Personenschäden in Europa im Jahr 2002²⁰⁴

Land	Getötete (€)	Schwerverletzte (€)	Leichtverletzte (€)
Schweiz	1.649.197	145.364	15.488
Großbritannien	1.458.190	163.857	12.635
Finnland	1.402.261	189.000	36.580
Niederlande	1.302.700	-	-
Schweden	1.270.792	226.712	12.700
Deutschland	1.117.382	77.723	3.401
Ungarn	835.379	57.965	7.672
Lettland	660.900	15.040	178
Dänemark	644.608	66.632	18.187
Litauen	525.664	42.503	-
Tschechien	488.302	-	-
Italien	452.136	-	-
Spanien	211.920	-	-
Slowakei	206.316	36.642	656

Die zweite Gruppe der in Abbildung 9 genannten Methoden, die Zahlungsbereitschaftsverfahren, bringen ebenfalls Probleme mit sich. Man unterscheidet hier die Ansätze willingness-to-pay und willingness-to-accept, bei denen ermittelt wird, was ein potentieller Unfallopfer bereit wäre, für die Vermeidung eines Unfalls zu bezahlen bzw. welche Zahlungen es erhalten müsste, um einen Unfall zu erdulden. Hierbei kommt es jedoch häufig zu Diskrepanzen zwischen einer geäußerten Zahlungsbereitschaft für einen hypothetischen Fall und der tatsächlichen Zahlungsbereitschaft im Ernstfall, so dass dieser Ansatz für die Bewertung von Unfallkosten und in der Gesundheitsökonomik keine Anwendung findet.^{205,206} Noch weit schwieriger ist die Quantifizierung von Lebensqualitätsinbußen durch eine Verletzung mit dauerhaften Folgeschäden. Zu diesem Problemfeld sei hier jedoch nur auf die Literatur verwiesen.²⁰⁷

Die *Nutzwertanalyse* wurde ursprünglich zur Bewertung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben sowie Produktinnovationen entwickelt. Sie wird heute auch in vielen anderen Bereichen eingesetzt, z. B. bei der Standortwahl oder der Bewertung von Infra-

²⁰⁴ Bickel, P.; Burgess, A.; Hunt, A.: HEATCO: Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment. Deliverable 2 Draft 1.9, 2005, S. 155. Nach: Auerbach, H.; Issing, M.; Karrer, K. et al.: Fahrzeuggestützte Notrufsysteme (eCall) für die Verkehrssicherheit in Deutschland. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Heft F 69. Wirtschaftsverlag NW, Bergisch-Glatbach, 2008, S. 16.

²⁰⁵ Baum, H.; Höhnscheid, K.: Volkswirtschaftliche Kosten der Personenschäden im Straßenverkehr. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Heft M 102. Wirtschaftsverlag NW, Bergisch-Glatbach, 1999, S. 10-11.

²⁰⁶ Graf von der Schulenburg, J.; Greiner, W.: Gesundheitsökonomik. Mohr Siebeck, Tübingen, 2000.

²⁰⁷ Bspw. Schöffski, O.; Greiner, W.: Das Konzept der qualitätskorrigierten Lebensjahre als prominentester Vertreter der Kosten-Nutzwert-Analyse. In: Schöffski, O.; Graf von der Schulenburg, J. (Hrsg.): Gesundheitsökonomische Evaluationen. Berlin: Springer, 2008, S. 95-137.

strukturmaßnahmen.²⁰⁸ Nicht monetär erfassbare Nutzenaspekte können dabei in die Bewertung einfließen.

Zu Beginn werden bei der Nutzwertanalyse Zielkriterien festgelegt, anhand derer die Alternativen im späteren Verlauf des Verfahrens bewertet werden. Qualitative Aspekte werden dabei nicht monetarisiert, sondern in Punktwerte transformiert.²⁰⁹ Der Zielerreichungsgrad wird für alle Kriterien und alle betrachteten Varianten bestimmt und zu einem Nutzwert aggregiert. Dieser Nutzwert ist ein dimensionsloser Ordnungsindex, der eine Rangfolge der Alternativen ermöglicht. Der höchste Nutzwert stellt dabei die vorteilhafteste Lösung dar. Charakteristisch für die Nutzwertanalyse ist, dass die Bewertungskriterien, die bei dieser Methode als Ziele bezeichnet werden, in einzelne Teilziele aufgeteilt und hierarchisch strukturiert werden.²¹⁰

Die Verdichtung der Bewertung auf diesen Kennwert ist mancherlei Hinsicht problematisch. Der Nutzwert stellt eine dimensionslose Größe dar, deren Interpretation kaum möglich ist. Er enthält keine Aussage, wie „gut“ oder „schlecht“ eine Alternative ist, sondern erlaubt nur den relativen Vergleich und die Bildung einer Rangfolge. Durch die Verrechnung der unterschiedlichen Zielerreichungsgrade gehen außerdem Informationen verloren und das Ergebnis wird intransparent. Stärken und Schwächen einer Alternative sind anhand des Nutzwertes nicht erkennbar und zudem tritt ein kompensatorischer Effekt auf, da ein sehr schlecht erfülltes Ziel durch ein sehr gut erfülltes Ziel im Gesamtergebnis ausgeglichen werden kann.²¹¹ Diese Verrechnung positiver und negativer Einflüsse, die aus sachlich unabhängigen Zielkriterien resultieren, wird in der Literatur kritisch gesehen.²¹²

Die dritte der o. g. Methoden aus der Gruppe der Nutzenbewertungen, die *Kosten-Wirksamkeitsanalyse*, ist ein wirtschaftlich orientiertes Verfahren und hat im Vergleich zu den beiden anderen mehrere Vorteile. So werden bei der Kosten-Wirksamkeitsanalyse die Kostenkriterien getrennt von den Wirksamkeitskriterien betrachtet, was im Vergleich zum dimensionslosen, aggregierten Nutzenkennwert der Nutzwertanalyse höhere Transparenz schafft. Darüber hinaus können im Rahmen der Kosten-Wirksamkeitsanalyse auch nicht-monetäre Kriterien berücksichtigt werden, was ein Vorteil im Vergleich zur Kosten-Nutzen-Analyse ist. Die Anwendung der Kosten-Wirksamkeitsanalyse wird daher vor allem dann empfohlen, wenn monetäre Kriterien ein etwa gleich großes Gewicht wie die nicht-monetären haben, und die Kosten der Alternativen direkt ersichtlich werden sollen.²¹³ Aus diesen Gründen wird sie für die vorliegende Bewertungsaufgabe angewendet und im folgenden Kapitel näher beschrieben.

²⁰⁸ Adam, D.: Investitionscontrolling. Oldenbourg, München, 2000, S. 93-94.

²⁰⁹ Scheiner, J.: Bewertungsverfahren in der Verkehrsplanung. Raum und Mobilität - Arbeitspapiere des Fachgebiets Verkehrswesen und Verkehrsplanung Nr. 9. Universität Dortmund, 2003, S. 6.

²¹⁰ Klümper, B.; Möllers, H.; Zimmermann, E.: Kommunale Kosten- und Wirtschaftlichkeitsrechnung. Bernhardt-Witten, Witten, 2006, S. 468-470.

²¹¹ Adam, D., a. a. O., S. 102.

²¹² Siehe z. B. Höfler, F.: Verkehrswesen-Praxis. Band 1: Verkehrsplanung. Bauwerk, Berlin, 2004, S. 69.

²¹³ Breiing, A.; Knosala, R.: Bewerten technischer Systeme. Springer, Berlin, 1997, S. 249.

5.2. Grundlagen der Kosten-Wirksamkeitsanalyse

5.2.1. Ablauf

Wie bereits erläutert, bietet die Kosten-Wirksamkeitsanalyse die Möglichkeit, nicht oder nur schwierig monetarisierbare Effekte innerhalb einer Nutzenbewertung zu berücksichtigen. Aus diesem Grund ist diese Methode die bei gesundheitsökonomischen Evaluationen am häufigsten vertretene Studienform und wird z. B. für den Vergleich unterschiedlich wirksamer Behandlungsmethoden eingesetzt. Abbildung 10 zeigt den prinzipiellen Ablauf einer Kosten-Wirksamkeitsanalyse.

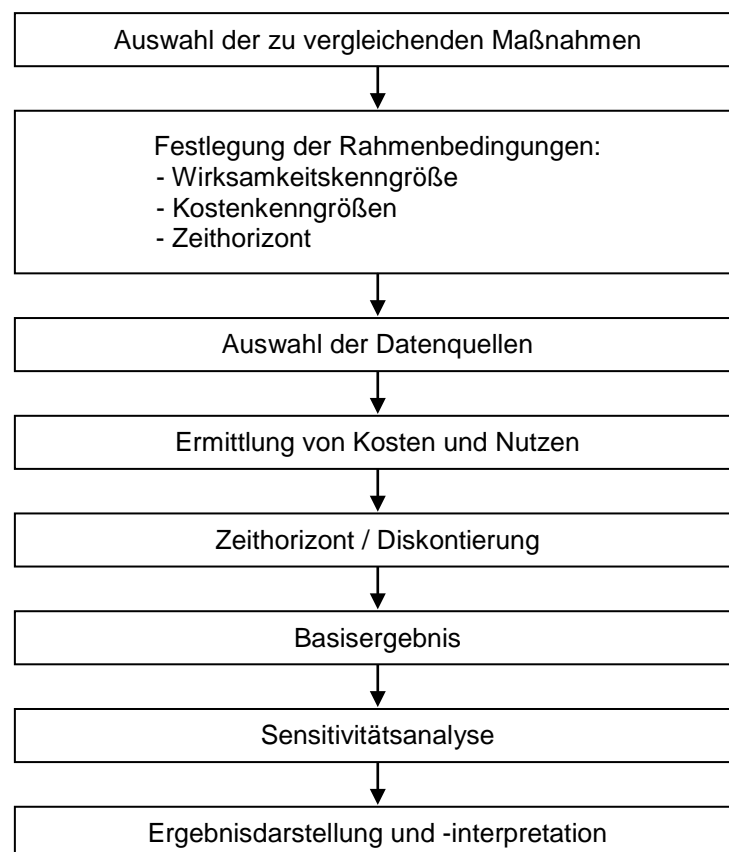


Abbildung 10: Prinzipieller Ablauf einer Kosten-Wirksamkeitsanalyse²¹⁴

Die Auswahl der zu vergleichenden Maßnahmen, die den ersten Schritt der Kosten-Wirksamkeitsanalyse darstellt, erfolgte bereits in Kapitel 4. Im zweiten Schritt ist eine Wirksamkeitskennzahl festzulegen, wobei anstelle einer Monetarisierung eine „naheliegende natürliche Einheit“²¹⁵ verwendet wird. Dieser Wirksamkeitskennzahl werden die Kosten der jeweiligen Maßnahme gegenübergestellt, so dass sich ein Kosten-Wirksamkeitsverhältnis ergibt:

²¹⁴ Eigene Darstellung in Anlehnung an Auerbach, H.; Issing, M.; Karrer, K. et al.: Fahrzeuggestützte Notrufsysteme (eCall) für die Verkehrssicherheit in Deutschland. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Heft F 69. Wirtschaftsverlag NW, Bergisch-Glatbach, 2008, S. 75.

²¹⁵ Schöffski, O.: Grundformen gesundheitsökonomischer Evaluationen. In: Schöffski, O.; Graf von der Schulenburg, J. (Hrsg.): Gesundheitsökonomische Evaluationen. Berlin: Springer, 2008, S. 83-84.

$$\text{Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis} = \frac{\text{Gesamtkosten}}{\text{Wirksamkeitskennzahl}} \quad (8)$$

Sowohl Kosten als auch Wirksamkeitskennzahl werden dabei aus der gesellschaftlichen Perspektive betrachtet, indem der aus gesamtwirtschaftlicher Sicht relevanten Ressourcenverzehr in die Bewertung eingeht. Dies bedeutet, dass alle Kosten- und Nutzenaspekte berücksichtigt werden, unabhängig davon, bei welcher gesellschaftlichen Gruppe sie entstehen.²¹⁶ Die Definition dieser Größen erfolgt in den Kapiteln 5.2.2 und 5.2.3. Die Definition des Zeithorizonts, Kapitel 5.2.4, legt fest, wie weit der Blick bei der Ermittlung der Kosten- und Nutzengrößen in die Zukunft gerichtet wird. Dies spielt sowohl bei der Diskontierung der Kosten als auch bei der Abschätzung der Nutzengröße, die z. B. von der Marktdurchdringungsrate einer Maßnahme abhängt, eine Rolle.

Die Auswahl der Datenquellen, die in Kapitel 5.2.5 erläutert wird, ist unter dem Gesichtspunkt der Transparenz des Bewertungsergebnisses von großer Bedeutung. In einer Untersuchung, bei der die Eigenschaften der zur Wahl stehenden Maßnahmen nicht durch eigene Experimente und Befragungen neu erhoben werden (sog. Desk Research oder Evidenzsynthese²¹⁷), ist es umso wichtiger, die Quellen der verwendeten Informationen offen zu legen. Dies gilt insbesondere dann, wenn die erforderlichen Daten nicht vollständig in der gewünschten Form der Literatur entnommen werden können, sondern mit Annahmen und Abschätzungen ergänzt werden müssen. Vereinfachende Ansätze sind dabei unvermeidbar, da nicht alle realen Eigenschaften und Zusammenhänge berücksichtigt werden können. Diese Einschränkungen müssen offengelegt und bewusst wahrgenommen werden.²¹⁸

Die Ermittlung von Kosten und Wirksamkeit der zur Auswahl stehenden Systeme erfolgt in Kapitel 5.3.2 bis 5.3.6 und liefert das Basisergebnis. Dieses Basisergebnis wird anschließend in Kapitel 5.3.7 einer Sensitivitätsanalyse unterzogen. Diese Analyse dient dazu, den Einfluss von Annahmen bzw. unsicheren Datenausprägungen offenzulegen, indem durch die Variation von Annahmen alternative Gesamtergebnisse erzeugt werden. Eine zusammenfassende Ergebnisdarstellung und -interpretation erfolgt in Kapitel 5.3.8.

5.2.2. Wirksamkeit

Die Fragestellung, mit welchen Systemen Unfälle in Straßentunneln vermieden werden können, zählt im weitesten Sinn zum Bereich der Verkehrsplanung. Die Ziele, die bei der Planung von verkehrlichen Maßnahmen verfolgt werden, sind vielschichtig, da Anforderungen aus unterschiedlichen Bereichen erfüllt werden müssen. Tabelle 18 zeigt am Beispiel einer Straßenbaumaßnahme, wie ein solches Ziel- und Kriteriensystem aufgebaut sein kann. Diese Aufzählung ist jedoch nicht erschöpfend, weitere Zielsetzungen wie z. B. die Erhaltung und Förderung der Wirtschaftskraft oder die Verbesserung der Stadt-

²¹⁶ Greiner, W.; Schöffski, O.: Grundprinzipien einer Wirtschaftlichkeitsuntersuchung. In: Schöffski, O.; Graf von der Schulenburg, J. (Hrsg.): Gesundheitsökonomische Evaluationen. Berlin: Springer, 2008, S. 168-169.

²¹⁷ Schöffski, O.: Datenherkunft. In: Schöffski, O.; Graf von der Schulenburg, J. (Hrsg.): Gesundheitsökonomische Evaluationen. Berlin: Springer, 2008, S. 196.

²¹⁸ Höfler, F.: Verkehrswesen-Praxis. Band 1: Verkehrsplanung. Bauwerk, Berlin, 2004, S. 65.

gestalt sind in Abhängigkeit von der jeweiligen Planungsaufgabe denkbar.²¹⁹ Auch makroökonomische Nutzen wie Einkommensverteilungs- und Beschäftigungseffekte können Kriterien einer Analyse sein.²²⁰

Tabelle 18: Ziel- und Kriteriensystem für eine Straßenbaumaßnahme²²¹

Planungsziel	Oberziele	Unterziele	Zielkriterien
Vergleich der zur Auswahl stehenden Varianten mit dem Status quo; Ermittlung der am besten geeigneten Maßnahme	Verbesserung des Verkehrsablaufs	Leistungsfähigkeit	Reisegeschwindigkeit
			Auslastung
			Trassierung
		Verkehrssicherheit	Unfallzahlen
			Unfallkosten
			...
	Erhöhung der Wirtschaftlichkeit	Investitions- und Unterhaltskosten	Baukosten
			Unterhaltskosten
			Betriebskosten
		Erschließungswirkung	Anbindung
			Erreichbarkeit
			...
	Verbesserung der Umweltqualität	Natur- und Landschaftsschutz	Flächenbedarf
			Biotopbildung
			...
		Immissionen	Lärm
			Erschütterungen
			Schadstoffe

In der vorliegenden Untersuchung geht es um bestehende Straßentunnel, wodurch einige der in Tabelle 18 genannten Ziele und Kriterien nicht anwendbar sind. Fragen des Natur- und Landschaftsschutzes z. B. spielen nur bei Neubauprojekten eine Rolle, ebenso wie die Erschließungswirkung. In Bezug auf die Leistungsfähigkeit eines Tunnels wird davon ausgegangen, dass durch die Vermeidung von Unfällen auch Staus verhindert werden, was sich positiv auf die Reisegeschwindigkeit auswirkt. Eine detaillierte Betrachtung von Effekten auf die Leistungsfähigkeit des Verkehrssystems erfolgt nicht. Ebenso wird im Hinblick auf Immissionen angenommen, dass eine geringere Zahl unfallbedingter Staus zu einer Reduktion des Schadstoffausstoßes führt. Der Versuch einer Quantifizierung wird nicht unternommen, ebenso wenig in Bezug auf weitere vermiedene Schäden, wie z. B. Sachschäden an Fahrzeugen oder am Bauwerk sowie wirtschaftliche Verluste durch eine Tunnelsperrung (Umwege, Ausfall von Mauteinnahmen etc.). Die entsprechenden Daten sind nur im Einzelfall verfügbar.²²²

²¹⁹ Steierwald, G.: Stadtverkehrsplanung. Springer, Berlin, 2005, S. 358.

²²⁰ Grawenhoff, S.: Ökonomische Bewertung von Fahrerassistenzsystemen. Methodische Grundlagen und empirische Analysen am Beispiel der Stau- und Querführungsassistenz. Herbert Baum Buchreihe des Instituts für Verkehrswissenschaft an der Universität zu Köln Nr. 62. Verkehrsverlag Fischer, 2006, S. 169ff.

²²¹ Nach: Höfler, F.: Verkehrswesen-Praxis. Band 1: Verkehrsplanung. Bauwerk, Berlin, 2004, S. 68.

²²² Bspw. Münchner Rück: Risk Management Tunnel. München, 2003, S. 11: Einnahmenausfall nach dem Unfall im Tauerntunnel 1999: 20 Millionen Euro zzgl. Reparaturkosten von 8,5 Millionen Euro. Schätzwert-

Neben den positiven Effekten auf Sicherheit, Umwelt und Reisezeiten müssten bei einer vollständigen Bewertung auch negative Effekte von Systemen der aktiven Sicherheit in die Betrachtung mit einfließen. Diese können z. B. in einer Verschlechterung des Verkehrsstroms durch ein nicht-optimal abgestimmtes System oder sogar in einer Erhöhung der Unfallzahlen durch eine schlecht gestaltete Mensch-Maschine-Schnittstelle bestehen. Effekte solcher Art lassen sich in Simulations- und Fahrsimulatorstudien abschätzen, doch die Verfügbarkeit von Daten ist beschränkt.²²³ In die vorliegende Untersuchung fließen diese Effekte daher nicht ein.

Das Ziel der hier ausgewählten Systeme liegt ausschließlich in der Vermeidung von Unfällen, und als Wirksamkeitskennzahl wird die Anzahl der geretteten Leben verwendet. Es könnte darüber hinaus berücksichtigt werden, wie viele Unfallopfer durch die Maßnahmen nicht mehr zur Kategorie „schwer verletzt“ zählen, sondern nur noch „leicht verletzt“ werden.²²⁴ Die vorliegenden Daten erlauben eine solche Zuordnung jedoch nicht. Darüber hinaus wäre eine solche Betrachtung nur im Rahmen einer ergänzenden Berechnung möglich, da die Kosten-Wirksamkeitsanalyse die Wirksamkeit bzw. den Nutzen nur anhand eines einzigen Parameters erfasst. Mehrere Nutzengrößen können bei dieser Methode nicht gleichzeitig in die Bewertung eingehen.²²⁵

Zur Abschätzung der Wirksamkeit eines Systems gibt es mehrere Methoden, von denen im Folgenden drei beschrieben werden.²²⁶ Die aufwändigste stellen Feldtests dar, in denen Fahrzeuge, die das neue System enthalten, an Versuchsteilnehmer abgegeben werden und über eine längere Zeitspanne deren Fahrverhalten und Umgang mit dem System aufzeichnen. Beispiele für solche Feldtests sind der Intelligent Cruise Control Field Operational Test²²⁷, der Automotive Collision Avoidance System Field Operational Test²²⁸ und die 100-Car Naturalistic Driving Study²²⁹ der National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) in den USA. Diese Feldtests haben den Vorteil, qualitativ hochwertige Daten für das jeweils untersuchte System zu liefern. Ihr Nachteil liegt in dem hohen Aufwand an Material, Personal und Zeit, der erforderlich ist und enorme Kosten verursacht.

Mikroskopische Verkehrssimulation ist eine weitere Methode zur Wirkungsabschätzung von Sicherheitssystemen. Typische Indikatoren, die in solchen Studien ermittelt werden,

te für den Montblanc-Tunnel 1999 betragen 203 Millionen Euro Einnahmenausfall und 189 Millionen Euro Reparaturkosten.

²²³ Abele, J.; Kerlen, C.; Krüger, S. et al.: SEISS: Exploratory Study on the Potential Socio-economic Impact of the Introduction of Intelligent Safety Systems in Road Vehicles. Teltow, 2005, S. 1.

²²⁴ Siehe z. B. Auerbach, H.; Issing, M.; Karrer, K. et al.: Fahrzeuggestützte Notrufsysteme (eCall) für die Verkehrssicherheit in Deutschland. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Heft F 69. Wirtschaftsverlag NW, Bergisch-Glatbach, 2008.

²²⁵ Auerbach, H.; Issing, M.; Karrer, K. et al., a. a. O., S. 78.

²²⁶ Abele, J.; Kerlen, C.; Krüger, S. et al., a. a. O., S. 29.

²²⁷ Fancher, P.; Ervin, R.; Sayer, J. et al.: Intelligent Cruise Control Field Operational Test, DOT HS 808 849. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, 1998..

²²⁸ University of Michigan Transportation Research Institute and General Motors Research and Development Center: Automotive Collision Avoidance System Field Operational Test Report - Methodology and Results. DOT HS 809 900. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, 2005.

²²⁹ Dingus, T. A.; Klauer, S. G.; Neale, V. L. et al.: The 100-Car Naturalistic Driving Study. Phase II: Results of the 100-Car Field, DOT HS 810 593. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, 2006.

sind die Time-to-Collision²³⁰ oder die Anzahl an Schockwellen innerhalb des Verkehrsflusses. Vorteil der Simulation ist, dass eine große Anzahl an Parametervariationen und Verkehrssituationen mit relativ geringem Aufwand untersucht werden können. Dem stehen die Nachteile gegenüber, dass die Qualität der Simulationsergebnisse nur bei einem entsprechend guten Modell hoch ist. Außerdem ist die Simulation auf Teilabschnitte des Verkehrsnetzes beschränkt, da die Berücksichtigung des gesamten Netzes eine nicht zu bewerkstellende Anzahl an Simulationsdurchläufen erfordern würde.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Sicherheitswirkung der betrachteten Systeme anhand des erwarteten Rückgangs der Getöteten abgeschätzt. Die Basis bilden zum einen die Unfalldatenanalyse, zum anderen die Systemeigenschaften, aus denen das Wirkungsfeld und das Sicherheitspotential bestimmt werden. Diese Herangehensweise ist theoretischer Art, wodurch die Dynamik von Verkehrssituationen, die in eine Simulation mit einfließen kann, oder die natürliche Umgebung eines Feldtests, nicht berücksichtigt werden. Dennoch stellt diese Methode ein praktikables Vorgehen dar, um die Wirkung von Sicherheitssystemen abzuschätzen.²³¹

Die Betrachtung des Wirkungsfeldes einer Maßnahme liefert eine Abschätzung ihrer Wirksamkeit bezogen auf einen bestimmten Unfalltyp. Verglichen wird dabei der *without-case/Ohne-Fall* mit dem *with-case/Mit-Fall*.^{232,233} Der erste Schritt besteht darin, die Unfalldaten für ein Bezugsjahr zu ermitteln. Auf dieser Basis wird im *Ohne-Fall* abgeschätzt, wie viele Getötete es in einem festgelegten Zeitraum geben würde, wenn keine zusätzlichen Sicherheitsmaßnahmen ergriffen werden. Anhand des Wirkungspotentials eines Systems wird im nächsten Schritt ermittelt, wie viele Getötete im *Mit-Fall* vermieden würden. Die Differenz zwischen *Ohne-* und *Mit-Fall* stellt den Sicherheitsgewinn und damit die Wirksamkeit des Systems dar. Voraussetzung dabei ist die *ceteris paribus*-Bedingung, die in diesem Fall besagt, dass die Einbringung eines zusätzlichen Sicherheitssystems der einzige Unterschied zwischen dem jeweiligen *Mit-Fall* und dem *Ohne-Fall* ist und alle sonstigen Parameter unverändert bleiben.

5.2.3. Kosten

Die Wirksamkeit der Systeme, ausgedrückt in der Anzahl der vermiedenen Getöteten, wird zu den jeweiligen Kosten in Beziehung gesetzt, vgl. Formel (8) in Abschnitt 5.2.1. Da sie nicht für jedes System zum selben Zeitpunkt auftreten, werden die jeweiligen Werte auf einen einheitlichen Zeitpunkt bezogen und diskontiert.²³⁴

²³⁰ Vgl. Kapitel 4.2.3.

²³¹ Abele, J.; Kerlen, C.; Krüger, S. et al.: SEISS: Exploratory Study on the Potential Socio-economic Impact of the Introduction of Intelligent Safety Systems in Road Vehicles. Teltow, 2005, S. 29.

²³² Abele, J.; Kerlen, C.; Krüger, S. et al., a. a. O., S. 30.

²³³ Assing, K.; Baum, H.; Böhne, J. et al.: eIMPACT: Methodological Framework and Database for Socio-economic Evaluation of Intelligent Vehicle Safety Systems. Deliverable D3, 2006, S. 26.

²³⁴ Der Diskontierung (Abzinsung) liegt die Auffassung zu Grunde, dass ein Betrag, der erst zu einem Zeitpunkt in der Zukunft fällig ist, heute weniger wert und daher abzuzinsen ist. Siehe z. B. Blanke, B.: Modernes Management für die Verwaltung. Pöschel, Hannover, 2005, S. 293.

Der Gegenwartswert zukünftiger Zahlungen, der sog. Barwert, wird nach der Kapitalwertmethode wie folgt berechnet:²³⁵

$$\text{Barwert} = \sum_{t=1}^n \frac{K_t}{(1+r)^t} \quad (9)$$

mit

K_t = Kosten in Periode t

r = Diskontierungssatz

n = Zeithorizont

Dieser Formel liegt die Annahme zugrunde, dass in der Zukunft zu leistende Zahlungen in der Gegenwart einen geringeren Wert haben. Die erforderliche Summe könnte, sofern sie heute schon verfügbar ist, bis zum Fälligkeitstermin angelegt werden, und die dabei erwirtschafteten Zinsen verringern den Wert der zu leistenden Zahlung.

Die Festsetzung des Diskontierungssatzes hat dabei Auswirkungen auf das Beurteilungsergebnis, wenn sich die Zeitpunkte von Kosten- und Nutzenentstehung mehrerer Alternativen deutlich unterscheiden. Sie sind umso größer, je länger der betrachtete Zeithorizont ist.²³⁶ Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Diskontierungssatz von 5 % angenommen, der international als angemessen gilt.²³⁷ Angewendet wird er nur auf die Kosten der ausgewählten Maßnahmen, nicht jedoch auf den erwarteten Nutzen, da nicht-monetäre Nutzengrößen üblicherweise nicht diskontiert werden.^{238,239}

Streng genommen müssten die ermittelten Kostenschätzungen zusätzlich zur Diskontierung mit der zu erwartenden Inflationsrate bewertet werden. Hierauf wird jedoch verzichtet, da die erforderlichen Schätzungen einen weiteren Unsicherheitsfaktor in die Bewertung einbringen würden.

Als relevante Kosten werden die Systemkosten betrachtet. Betriebskosten gehen nicht in die Bewertung ein, da für die meisten Systeme entsprechende Daten nicht verfügbar sind. Die Systemkosten werden anhand vorhandener Verkaufspreise für Vergleichssysteme bzw. Schätzungen aus Forschungsberichten bestimmt. In Bezug auf die Entwicklung der Systemkosten ist davon auszugehen, dass sie über den Betrachtungszeitraum zurückgehen, da die erforderlichen elektronischen Komponenten durch den technischen Fortschritt

²³⁵ Greiner, W.; Schöffski, O.: Grundprinzipien einer Wirtschaftlichkeitsuntersuchung. In: Schöffski, O.; Graf von der Schulenburg, J. (Hrsg.): Gesundheitsökonomische Evaluationen. Springer, Berlin, 2008, S. 178-179.

²³⁶ Siehe Beispielrechnung in Greiner, W.; Schöffski, O., a. a. O., S. 183-185.

²³⁷ Schöffski, O.; Graf von der Schulenburg, J. (Hrsg.): Gesundheitsökonomische Evaluationen. Springer, Berlin, 2008, S. 179: Ein Diskontierungssatz von 5 % wird z. B. in Australien und Kanada staatlich vorgeschrieben und in Deutschland empfohlen. Siehe auch Auerbach, H.; Issing, M.; Karrer, K. et al.: Fahrzeuggestützte Notrufsysteme (eCall) für die Verkehrssicherheit in Deutschland. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Heft F 69. Wirtschaftsverlag NW, Bergisch-Glatbach, 2008, S. 78.

²³⁸ Auerbach, H.; Issing, M.; Karrer, K. et al.: Fahrzeuggestützte Notrufsysteme (eCall) für die Verkehrssicherheit in Deutschland. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Heft F 69. Wirtschaftsverlag NW, Bergisch-Glatbach, 2008, S. 78.

²³⁹ Greiner, W.; Schöffski, O., a. a. O., S. 181-182.

billiger werden. Wird das System von den Endkunden angenommen und in größerer Stückzahl hergestellt, so sorgt dies ebenfalls für sinkende Systemkosten.

Fraglich ist allerdings, inwieweit sinkende Systemkosten tatsächlich in einem Rückgang der Verkaufspreise resultieren. Die Produktionskosten von Fahrerassistenzsystemen wie z. B. Adaptive Cruise Control (ACC) machen nur einen Bruchteil des Verkaufspreises aus.^{240,241} Einen maßgeblichen Anteil haben dagegen Forschungs- und Entwicklungskosten, die vom Hersteller zunächst vorfinanziert werden müssen. Für die nächste Systemgeneration fallen weitere Forschungs- und Entwicklungskosten an, die ebenfalls dafür sorgen, dass der Preisrückgang u. U. geringer ausfällt oder sich langsamer entwickelt als der Endverbraucher dies erwarten würde. Es ist auch üblich, dass der Verkaufspreis eines Systems weitgehend konstant bleibt, aber durch Weiterentwicklungen ein erweiterter Funktionsumfang zur Verfügung steht. Dies stellt einen indirekten Preisnachlass dar.

Die Abhängigkeit des Preises von den produzierten Stückzahlen lässt sich am Beispiel von Navigationsgeräten zeigen. Im Jahr 2004 betrug der Absatz an Navigationsgeräten in Deutschland 929.000 Stück (portabel und fest installiert) und nahm bis 2007 auf 5.472.000 Stück zu. Im gleichen Zeitraum ging der durchschnittliche Preis von 824 € auf 285 € zurück.²⁴² Eine sechsmal höhere Stückzahl hatte somit die Reduktion des Preises um ca. zwei Drittel zur Folge. Für die Betrachtung von Assistenzsystemen wie I2C-Abstandswarnung und Intelligent Speed Adaptation sind diese Zahlen jedoch nicht geeignet. Für einen Vergleich wird hier Adaptive Cruise Control herangezogen. Das System ist seit 1998 in deutschen Pkw verfügbar und hatte bis 2006 eine Marktdurchdringung von 1 % erreicht, für 2010 werden 3 % erwartet.²⁴³ Die Verbreitung erfolgte damit wesentlich langsamer als die der Navigationsgeräte. Auch bei der Preisentwicklung zeigt sich ein anderes Bild, dass allerdings ohne Detailkenntnis über den Funktionsumfang nur schwierig zu beurteilen ist. Bei Audi kostete ACC im Jahr 2006 bspw. 1.470 €, während 2010 der Preis 1.025 € beträgt. Dies entspricht einem Rückgang um ca. 30 % innerhalb von 4 Jahren. Ein Gegenbeispiel liefert Volvo, für dessen ACC 2006 1.500 € zu zahlen waren und 2010 1.700 €. Hier liegt eine Erhöhung um ca. 13 % im selben Zeitraum vor. Inwieweit sich die Systeme in Funktionsumfang und Stückzahl unterscheiden und somit der Preisunterschied begründet ist, lässt sich an dieser Stelle nicht sagen. Ein Vergleich über mehrere Hersteller wird dadurch erschwert, dass ACC bei einigen Teil eines Ausstattungspakets ist, für das nur ein Gesamtpreis existiert. Dies ist z. B. der Fall bei Lexus, 3.500 € für ACC i.V.m. pre-crash-safety, oder Honda, 2.450 € für ACC i.V.m. Lane Departure Warning.^{244,245}

²⁴⁰ Abele, J.; Kerlen, C.; Krüger, S. et al.: SEISS: Exploratory Study on the Potential Socio-economic Impact of the Introduction of Intelligent Safety Systems in Road Vehicles. Teltow, 2005, S. 49.

²⁴¹ Assing, K.; Baum, H.; Bühne, J. et al.: eIMPACT: Methodological Framework and Database for Socio-economic Evaluation of Intelligent Vehicle Safety Systems. Deliverable D3, 2006, S. 96.

²⁴² Focus Marktanalysen: Der Markt der Mobilität. Daten, Fakten, Trends. 2008, S. 29.

²⁴³ Abele, J.; Kerlen, C.; Krüger, S. et al., a. a. O., S. 148.

²⁴⁴ Preise Herbst 2006: Oltersdorf, K.: Fahrerassistenzsysteme. Institut für Transportation Design, Braunschweig, 2008, S. 11.

²⁴⁵ Preise Frühjahr 2010: ADAC: Test Abstandregelsysteme: Technische Daten der getesteten Modelle. http://www1.adac.de/images/Tabelle_Test_Abstandsregelsysteme_tcm8-245319.pdf, abgerufen am 22. Mai 2010.

Es bleibt jedoch festzuhalten, dass der Preisrückgang von ACC im Vergleich zu Navigationssystemen langsamer vonstattengeht. Die Gründe hierfür sind zum einen das von Beginn an höhere Preisniveau von ACC zum anderen die Art der gewährten Unterstützung. Der Nutzen eines Navigationssystems erschließt sich unmittelbar und ist direkt erfahrbare, während ACC dem Fahrer eine Lernphase abverlangt.²⁴⁶ Darüber hinaus zählt ACC zu den intervenierenden Fahrerassistenzsystemen, gegen die zum Teil Vorbehalte bestehen.

Für die hier betrachteten Systeme I2C-Abstandswarnung und Intelligent Speed Adaptation ist in Bezug auf die Preisentwicklung das Beispiel ACC von Relevanz. Es wird daher angenommen, dass die geschätzten Preise innerhalb von 10 Jahren um 30 % abnehmen. Section Control, Moving Spot Light System sowie die Infrastrukturanteile von I2C-Abstandswarnung und Intelligent Speed Adaptation richten sich als Investitionsgüter nicht an Endverbraucher, doch es ist im Prinzip von einer ähnlichen Entwicklung in Bezug auf Produktions- und Entwicklungskosten auszugehen. Der Umfang des Preisrückgangs wird allerdings geringer ausfallen und wird mit 10 % innerhalb von 10 Jahren angenommen.

Die Bewertung im Rahmen einer Kosten-Wirksamkeitsanalyse erfolgt aus gesellschaftlicher Sicht. Aus diesem Grund spielt es keine Rolle, wer die jeweiligen Kosten zu tragen hat, entscheidend ist allein ihre Höhe. Der Einfluss der Kostenverteilung wird in der Stakeholder-Analyse in Kapitel 6 erörtert.

5.2.4. Zeithorizont und Marktdurchdringung

5.2.4.1. Bedeutung und Einfluss

Die Wirkungsabschätzung für Systeme, die erst seit kurzem oder bislang gar nicht in Serie verfügbar sind, ist schwierig. In der vorliegenden Untersuchung gilt dies insbesondere für die I2C-Abstandswarnung, die sich derzeit noch im Forschungsstadium befinden. Zwar wird im Projekt *Sichere, intelligente Mobilität - Testfeld Deutschland*, SIM-TD, ein groß angelegter Feldtest durchgeführt, in dem eine markt- und praxistaugliche Umsetzung dieser Technologien erprobt werden soll, doch dessen Ergebnisse werden nicht vor Ende 2012 verfügbar sein.

Derzeit beträgt die Marktdurchdringung solcher Systeme daher „0“ und mit einer Einführung ist auf kurze Sicht nicht zu rechnen. Der Zeithorizont der hier durchgeführten Untersuchung muss daher entsprechend lang sein, um solche Systeme sinnvoll berücksichtigen zu können. Allzu lang sollte er jedoch auch nicht gewählt werden, da die Unsicherheit von Schätzungen zunimmt, je weiter sie sich in die Zukunft richten. Ausgehend vom Basisjahr 2009 wird der Zeithorizont daher auf zehn Jahre festgelegt und die Marktdurch-

²⁴⁶ Winner, H.: Adaptive Cruise Control. In: Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2009. S. 478-521. S. 519.

dringung für die Jahre 2013 und 2018 geschätzt.²⁴⁷ Für die Jahre dazwischen wird jeweils von einer linearen Entwicklung ausgegangen.

Schätzungen und generell Annahmen über zukünftige Entwicklungen sind mit Unsicherheiten behaftet. Sie werden auf Basis heute bekannter Daten und möglicher Trends ermittelt, die tatsächliche Situation in den Jahren 2013 und 2018 kann sich von diesen Annahmen dennoch ganz grundlegend unterscheiden. Für die Abschätzung der hier erforderlichen Daten wird auf Studien von Experten und Ergebnisse von Forschungsprojekte zurückgegriffen. Roadmaps von Automobilherstellern oder Zulieferern wären eine wertvolle Quelle für diese Überlegungen, da darin die Strategien und Erwartungen in Bezug auf die zukünftige Marktentwicklung zusammengefasst sind. Da sie damit jedoch den Kern der Markt- und Technologiestrategie des jeweiligen Unternehmens darstellen, sind sie höchstens in verallgemeinerter Form öffentlich zugänglich und ansonsten vertraulich.

5.2.4.2. Markteinführungsstrategien

Die Entwicklung der Marktdurchdringung eines Systems ist abhängig vom gewählten Modell der Markteinführung. Unterschieden werden die normative und die marktbestimmte Einführung.

Basis der normativen Markteinführung ist ein Gesetz, das vorschreibt, dass ab einem Zeitpunkt t alle neu zugelassenen Fahrzeuge mit einem bestimmten System ausgerüstet sein müssen. In einer verschärften Form muss außerdem der gesamte Fahrzeugbestand mit einem Nachrüstsystem ausgestattet werden. Solche normativen Vorgaben sorgen dafür, dass die Ausstattungsrate eines Systems ab dem Zeitpunkt t sprunghaft ansteigt und eine sehr schnelle Verbreitung erfolgt. Es wird jedoch häufig übersehen, dass normative Vorgaben meist erst einige Zeit nach einer marktbestimmten Einführung veranlasst werden, wenn sich das System bewährt hat. Dies lässt sich am Beispiel von ESP zeigen, das im Jahr 1995 in den Markt eingeführt wurde. Aufgrund des „A-Klasse-Vorfalles“ war es ab dem Jahr 1999 in allen Mercedes-Benz-Modellen serienmäßig enthalten und machte so sehr schnell sein Potential zur Erhöhung der Verkehrssicherheit deutlich. Eine Auswertung von Unfalldaten des statistischen Bundesamts zu den Fahrunfällen der Jahre 1996 bis 2001 zeigt, dass dank ESP – das in diesem Zeitraum bei anderen Herstellern noch kaum verbreitet war – der Anteil von Mercedes-Benz-Fahrzeugen an diesem Unfalltyp um ca. 5 % geringer war als bei anderen Marken, vgl. Abbildung 11.

Trotz dieses erwiesenen Nutzens für die Verkehrssicherheit wurde erst im März 2009 vom Europäischen Parlament eine Verordnung verabschiedet, nach der ESP ab 1. November 2011 europaweit verpflichtend Teil der Serienausstattung von Neufahrzeugen sein muss.²⁴⁸ Damit liegen zwischen der marktbestimmten und der normativen Einführung immerhin 16 Jahre. Hinzu kommt, dass von der Europäischen Kommission und den Mitgliedsstaaten selbst eine normative Einführung nur als letztes Mittel gilt und freiwilli-

²⁴⁷ Es werden somit zwei Zeiträume à 5 Jahre betrachtet: 2009, 2010, 2011, 2012 und 2013 sowie 2014, 2015, 2016, 2017 und 2018.

²⁴⁸ Schwab, A.; Kleiner, A.; Eichel, K.: Autos sollen sicherer und umweltfreundlicher werden. Pressemitteilung des Europäischen Parlaments Nr. 20090309IPR51330. http://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/infopress/20090309IPR51330/20090309IPR51330_de.pdf, abgerufen am 3. Mai 2009.

ge Lösungen bevorzugt werden.²⁴⁹ Die zukünftigen Marktdurchdringungsraten für die hier betrachteten Systeme werden aus diesem Grund ausschließlich auf Basis einer marktbestimmten Einführung geschätzt.

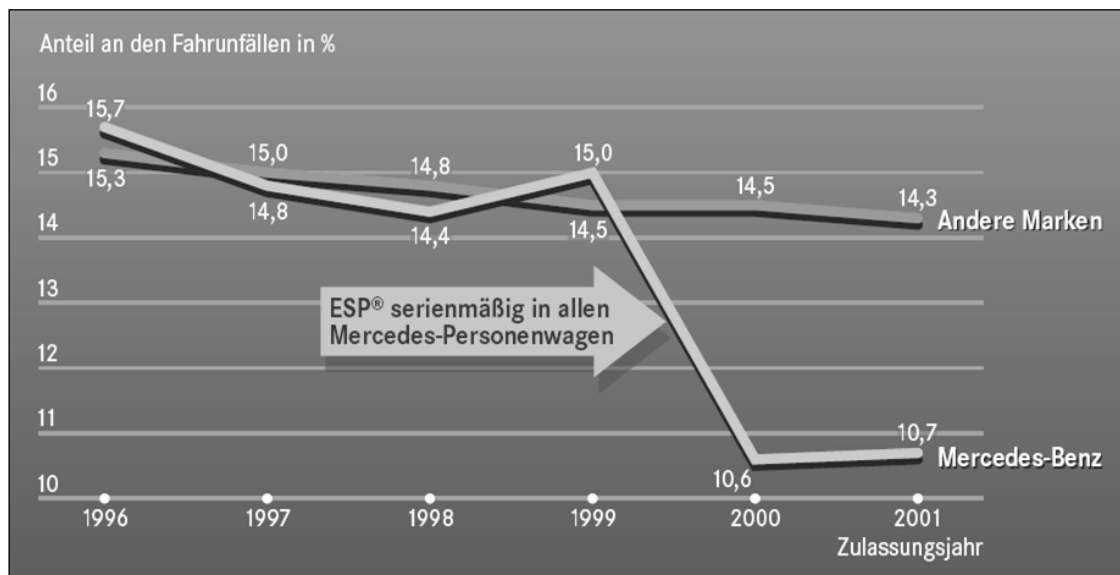


Abbildung 11: Sicherheitseffekt durch ESP²⁵⁰

In der Regel wird von Automobilherstellern die sog. Innovationskaskade als Markteinführungsstrategie gewählt.²⁵¹ Dies bedeutet, dass ein neues System oder eine neue Funktion zunächst nur in den höchstklassigen Fahrzeugen des Herstellers verfügbar ist und niedrigere Klassen erst mit einigem Zeitverzug erreicht. In den niedrigeren Klassen wird das System außerdem zunächst als aufpreispflichtige Sonderausstattung verkauft und erreicht in diesem Segment wiederum erst mit einigem Zeitverzug den Serienausstattungsstatus. Da die durchschnittliche Lebensdauer eines Fahrzeugs etwa zehn Jahre beträgt²⁵², dauert es auf diese Weise relativ lange, bis die gesamte Flotte über das System verfügt. Als Beispiel sei hier ABS genannt, das 1978 in den Markt eingeführt wurde und in Europa, ebenso wie in Deutschland, bis heute nicht in allen Fahrzeugen der Flotte enthalten ist, da der Fahrzeugbestand seit Einführung der ABS-Pflicht in allen Neuwagen im Jahr 2004 noch nicht vollständig ausgetauscht wurde. Auch der Bekanntheitsgrad in Deutschland ist nach mehr als 30 Jahren mit 70 % geringer als man erwarten könnte.²⁵³

Eine vollständige Marktdurchdringung erhält man theoretisch dann, wenn das System in die unterste Stufe der Kaskade gewandert ist, und der gesamte Fahrzeugbestand erneuert wurde. Es gibt es jedoch Einschränkungen, denn Oldtimer sind in der Regel nicht nach-

²⁴⁹ eSafety Forum: Final Report and Recommendations of the Implementation Road Map Working Group. Brüssel, 2005, S. 27.

²⁵⁰ Schöpf, H.-J.: Das praxisorientierte Sicherheitskonzept von Mercedes-Benz. Ohne Jahresangabe, S. 10. Datenbasis: Anonymisierte Stichproben aus den Unfalldaten des Statistischen Bundesamtes (1998-2001).

²⁵¹ Abele, J.; Kerlen, C.; Krüger, S. et al.: SEISS: Exploratory Study on the Potential Socio-economic Impact of the Introduction of Intelligent Safety Systems in Road Vehicles. Teltow, 2005, S. 68.

²⁵² Abele, J.; Kerlen, C.; Krüger, S. et al., a. a. O., S. 28.

²⁵³ Winterthur Group: Mehr Elektronik im Auto - mehr Sicherheit im Verkehr? Pressemitteilung, 2006, S. 3. Repräsentative Umfrage unter 500 Deutschen und 500 Schweizern. In der Schweiz war ABS 86 % der Befragten bekannt.

rüstbar, so dass in der Praxis nie 100 % erreicht werden. Insgesamt ist der Prozess der marktbestimmten Einführung eines Systems also recht langwierig. ESP kann hier nicht als Beispiel herangezogen werden, da in diesem Fall die Innovationskaskade untypisch schnell durchlaufen wurde. Der serienmäßige Einbau in Mercedes-Benz-Modelle aller Klassen ab 1999 hatte zur Folge, dass auch in Fahrzeugen anderer Hersteller die niedrigeren Modellklassen nach kürzerer Zeit als üblich erreicht wurden. Auf diese Weise waren laut einer Marktanalyse des Gesamtverbands der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. im Jahr 2006 58 % der 257 in Deutschland erhältlichen Modellreihen von 38 Automarken serienmäßig mit ESP ausgestattet. Gleichzeitig hatte ESP im Gesamtbestand aller Pkw in Deutschland nur einen Anteil von 24 %, was dennoch einen Spitzenplatz in Europa darstellte.²⁵⁴

In Bezug auf die Einbringung zusätzlicher Sicherheitssysteme in Straßentunnel wird im Gegensatz zu den Fahrzeugen von einer normativen Einführung auf EU-Ebenen ausgegangen. Es wird angenommen, dass eine Novellierung der bestehenden Richtlinie 2004/54/EG über die Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln den Einbau zusätzlicher Systeme verlangt und zwar sowohl bei Neubauten als auch im Bestand. Üblicherweise sind Richtlinien dieser Art mit einem Umsetzungszeitraum verbunden, bei der Tunnelrichtlinie betrug er für die Nachrüstung bestehender Tunnel regulär zehn, mit Verlängerungsoption 15 Jahre.

Die Abschätzung der Marktdurchdringung erfolgt für die ausgewählten Systeme anhand von Klassen, da eine exakte Schätzung nicht möglich ist. In Anlehnung an das Projekt eIMPACT kommen die folgenden fünf Klassen zur Anwendung:

- *sehr niedrig*, 0-5 %,
- *niedrig*, 5-20 %,
- *mittel*, 21-50 %,
- *hoch*, 51-80 % und
- *sehr hoch*, 81-100 %.²⁵⁵

Diese Angaben beziehen sich je nach System auf die Durchdringung der Fahrzeugflotte oder den Anteil der ausgerüsteten Tunnel.

5.2.5. Datenquellen

Die Eingangsgrößen in die Kosten-Wirksamkeitsanalyse müssen, wie in den vorangegangenen Abschnitten bereits erläutert, anhand von Literaturangaben oder Abschätzungen und Annahmen bestimmt werden. Diese erfolgen auf Basis unterschiedlicher Quellen, bei denen es sich zumeist um Forschungsberichte bzw. Deliverables europäischer IVSS-

²⁵⁴ Brockmann, S.: ESP-Verfügbarkeit. Eine Untersuchung der Unfallforschung der Deutschen Versicherer. 7. September 2006 in Boxberg, S. 12-18.

²⁵⁵ Assing, K.; Baum, H.; Bühne, J. et al.: eIMPACT: Methodological Framework and Database for Socio-economic Evaluation of Intelligent Vehicle Safety Systems. Deliverable D3, 2006, S. 38.

Projekte handelt. Die Bearbeitung dieser Projekte erfolgt durch Fachleute und Experten, es ist jedoch zu beachten, welche Annahmen jeweils getroffen wurden.

Die Herkunft jeder Eingangsgröße der Kosten-Wirksamkeitsanalyse ist anhand von Fußnoten nachvollziehbar. Ebenso wird auf Berechnungen und Abschätzungen im Anhang dieser Arbeit verwiesen.

5.2.6. Zusammenfassung der Randbedingungen

Die in den vorangegangenen Kapiteln erläuterten Randbedingungen der Kosten-Wirksamkeitsanalyse sind in Tabelle 19 zusammengefasst.

Tabelle 19: Randbedingungen der Kosten-Wirksamkeitsanalyse

Methode:	Kosten-Wirksamkeitsanalyse
Ausgangsbasis:	Stand der Tunnel- und Fahrzeugausrüstung 2009
Ohne-Fall:	Fortschreibung der Ausgangsbasis unter der Annahme, dass keine zusätzlichen Sicherheitssysteme in Fahrzeuge oder Tunnel eingebracht werden
Mit-Fälle:	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Moving Spot Light System ▪ I2C-Abstandswarnung ▪ Section Control ▪ Intelligent Speed Adaptation
Perspektive:	gesellschaftlich
Zeithorizont:	2009 – 2013 – 2018
Nutzenparameter:	Reduzierung der Anzahl der Getöteten bei Unfällen in Straßentunneln
Kostenparameter:	Systemkosten (Investitionen)
Datenquellen:	diverse, siehe Fußnoten und Anhang
Diskontierung:	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kosten: 5 % p. a. ▪ Nutzen: keine
Inflationsbereinigung:	nein

5.3. Durchführung der Bewertung

5.3.1. Das Vergleichsszenario *Ohne-Fall*

Als Vergleichsmaßstab für die Bewertung der ausgewählten Systeme dient eine *Ceteris paribus*-Betrachtung am Beispiel von Österreich. Daten zum Unfallgeschehen in Straßentunneln liegen vor²⁵⁶ und werden als Basis herangezogen, um abzuschätzen, wie viele Menschen im Betrachtungszeitraum getötet würden, wenn die Ausstattung von Fahrzeugen und Tunneln unverändert bliebe. Neben der Einführung von sicherheitssteigernden Systemen, wie sie im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden, gibt es allerdings weitere Einflüsse auf die Entwicklung der Unfallzahlen. So ist zum einen von einem generellen Rückgang der Unfallgeschädigten auszugehen, der auf Verbesserungen der Infrastruktur und der Fahrzeuge zurückzuführen ist. Diese Verbesserungen haben in der Vergangenheit dafür gesorgt, dass die Zahl der Getöteten stärker zurückgegangen ist als die Zahl der

²⁵⁶ Siehe Kapitel 3.

Unfälle. Für die Europäische Union (EU-15) wird prognostiziert, dass dieser Einfluss zu einer Reduktion der Zahl der Getöteten von 2 % pro Jahr führt.²⁵⁷ Zum anderen wird eine Zunahme des privaten und des Gütertransportverkehrs für die kommenden Jahre vorausgesagt, mit dem eine Erhöhung der Unfallhäufigkeit und der Anzahl der Getöteten einhergeht. Laut einer Untersuchung des norwegischen Instituts für Verkehrsökonomie zieht ein Verkehrswachstum von 100 % eine Zunahme der tödlichen Unfälle um durchschnittlich 25 % nach sich. Wie groß diese Zunahme für einen bestimmten Streckenabschnitt tatsächlich ausfällt, hängt dabei von Straßenzustand, Verkehrsvolumen und Verkehrszusammensetzung sowie weiteren Faktoren ab.²⁵⁸

Im Rahmen dieser Arbeit werden beide Entwicklungen unter der Annahme, dass sie sich gegenseitig weitgehend aufheben, nicht berücksichtigt. Im hier zum Vergleich herangezogenen *Ohne-Fall* wird der Ausgangszustand der Österreichischen Unfalldatenanalyse ohne Berücksichtigung weiterer Einflüsse fortgeschrieben. Die Vergleichsszenarien, d. h. die unterschiedlichen *Mit-Fälle*, unterscheiden sich vom *Ohne-Fall* einzig durch das Vorhandensein des jeweiligen Sicherheitssystems, weitere Einflüsse gehen nicht in die Betrachtung ein. Diese Anwendung der Ceteris paribus-Bedingung stellt sicher, dass ausschließlich die Wirkung der Sicherheitssysteme ermittelt wird und Unsicherheiten durch weitere prognostizierte Größen vermieden werden.

Wie in Kapitel 3.1.1 dargelegt, sterben pro Jahr durchschnittlich 13 Menschen bei Unfällen in Österreichischen Straßentunneln. Die Unfälle sind dabei zu 43 % Auffahr- und zu 27 % Alleinunfälle, d. h. im *Ohne-Fall* wird angenommen, dass durchschnittlich sechs Menschen pro Jahr bei Auffahr- und vier bei Alleinunfällen ums Leben kommen. Bis zum Jahr 2013 kumuliert sich dies auf 30 bzw. 20 Getötete und bis 2018 auf 60 bzw. 40.²⁵⁹ Diese Werte dienen als Vergleichsmaßstab für die Sicherheitswirkung der ausgewählten Systeme, die in den folgenden Kapiteln beschrieben wird.

5.3.2. Moving Spot Light System

5.3.2.1. Systembeschreibung

Die Grundidee des Moving Spot Light Systems ist, die Fahrer mit Leit-Lichter durch den Tunnel zu leiten und ihnen zu übermitteln, ob ihr Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug ausreichend oder zu gering ist. Hierfür werden im Tunnel Fahrzeugdetektoren installiert, z. B. in Form von Radar- oder Videosensoren. Mit Hilfe dieser Sensoren werden Fahrzeugposition und -geschwindigkeit erfasst, mit einem Zeitstempel versehen und an die Auswerte- und Steuereinheit übertragen. Ebenfalls in der Tunnelwand montiert, finden sich LED-Leuchten, deren Farbe in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des betrachteten Fahrzeugs und seines Abstands zum Vordermann von der Auswerte- und Steuerein-

²⁵⁷ European Commission Directorate General Energy and Transport: Cost-benefit Assessment and Prioritisation of Vehicle Safety Technologies. Final Report. 2006, S. 39.

²⁵⁸ Transportøkonomisk Institutt (TOI): Trafikksikkerhetshåndbok. Road Safety Handbook, 1997. <http://tsh.toi.no/>. Nach: European Commission Directorate General Energy and Transport: Cost-benefit Assessment and Prioritisation of Vehicle Safety Technologies. Final Report. 2006, S. 39.

²⁵⁹ Alle Angaben wurden auf ganze Zahlen gerundet.

heit gesteuert wird.²⁶⁰ Solange der Abstand zwischen dem Ego-Fahrzeug und dem vorausfahrenden den in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit berechneten Sicherheitsabstand inkl. Puffer nicht unterschreitet, leuchten die LEDs grün und bewegen sich in einer Art Welle mit dem Fahrzeug fort. Halten beide Fahrzeuge ihre Geschwindigkeit und bleibt somit der Abstand zwischen ihnen konstant, werden sie durch die Fortbewegung der grünen Lichter sicher durch den Tunnel geleitet. Dieser Zustand wird als „Sicherer Zustand“ bezeichnet und ist in Abbildung 12 zu sehen. Darin stellen die schwarz ausgefüllten Kreise entlang der Fahrbahn die Fahrzeugdetektoren dar.

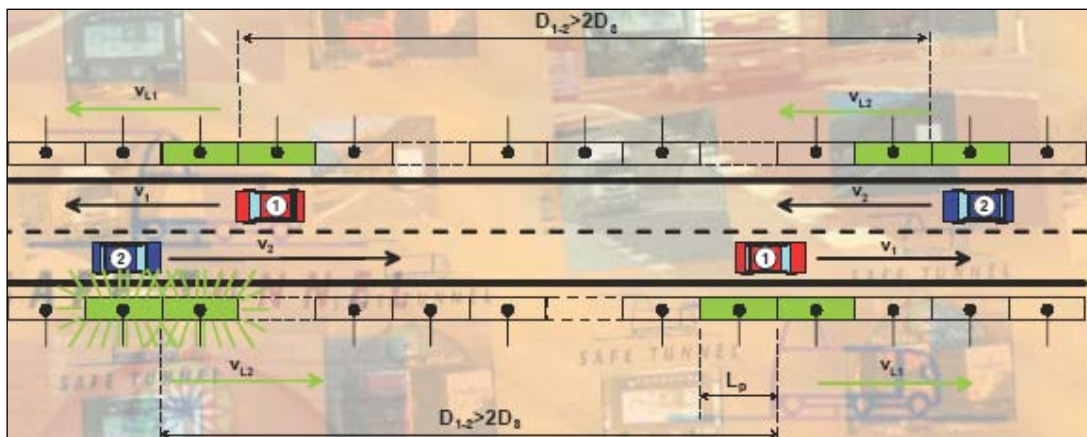


Abbildung 12: Moving Spot Light System – Sicherer Zustand²⁶¹

Wird der Sicherheitsabstand unterschritten, wird eine Warnung an den auffahrenden Fahrer ausgegeben, indem die LEDs von der Steuereinheit auf gelb geschaltet werden, siehe Abbildung 13. Die Schaltung der Lichter (Welle) verlangsamt sich außerdem, um den Fahrer dazu zu bringen, seine Geschwindigkeit zu reduzieren. Verringert sich der Abstand stattdessen weiter und erreicht eine kritische Schwelle, leuchten die LEDs rot und blinken, um maximale Aufmerksamkeit zu erregen (Gefahrenzustand, ohne Abbildung).

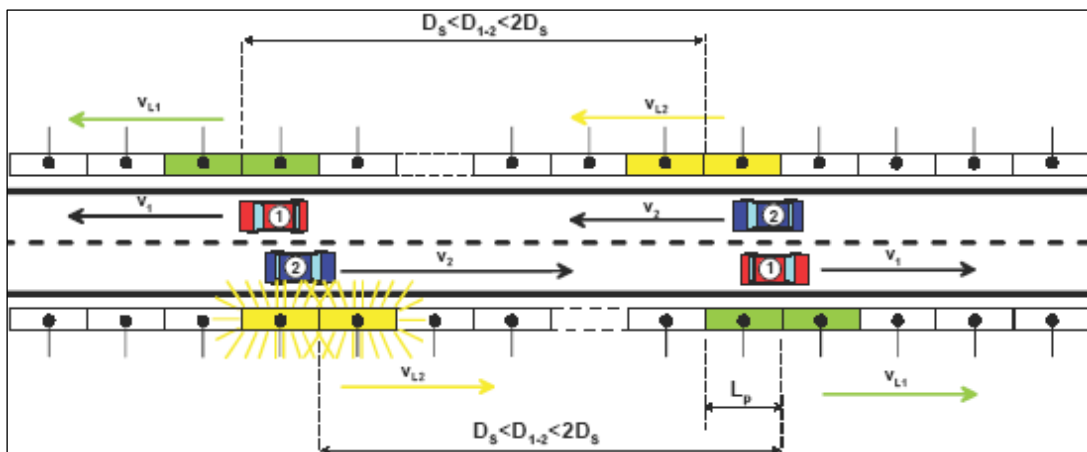


Abbildung 13: Moving Spot Light System – Warnzustand²⁶²

²⁶⁰ Fiat Engineering: Moving Spotlight System. Abschlusspräsentation der europäischen Projekte Safe Tunnel und SIRTAKI im Rahmen des Forums Safety in Road and Rail Tunnels, 20.-21. Dezember 2004 in Turin, S. 3.

²⁶¹ Fiat Engineering: Moving Spot Light System. Safe Tunnel, 1st Workshop, 12. Dezember 2002, S. 4.

²⁶² Fiat Engineering, a.a. O., S. 5.

Als weitere Warnstufe wurde im Projekt Safe Tunnel die „Extreme Danger Situation“ definiert, die dann eintritt, wenn ein Fahrzeug im Tunnel zum Stehen kommt. In diesem Fall werden die LEDs rot und blinkend geschaltet und je näher sie sich an dem stehenden Fahrzeug befinden, desto geringer wird der Abstand zwischen den aktiven Leuchten.

Gesteuert werden sowohl die Fahrzeugdetektion und als auch die Lichtwelle (Farbe und Geschwindigkeit) durch das Tunnelkontrollzentrum, in das die zusätzlichen, in Abbildung 14 zu sehenden Komponenten integriert werden.

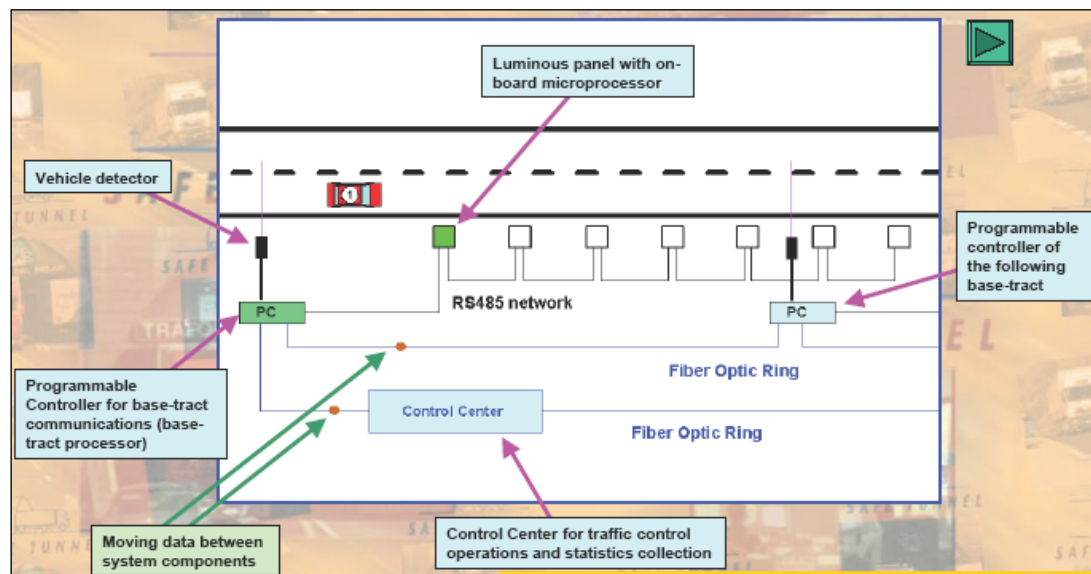


Abbildung 14: Systemaufbau Moving Spot Light System²⁶³

5.3.2.2. Ausgangslage

Bislang wurde das Moving Spot Light System nur im Simulator umgesetzt und in Bezug auf seine Wirksamkeit untersucht. Die hier getroffenen Annahmen basieren daher auf dieser Simulatorstudie²⁶⁴ sowie einer Studie zur Unfallvermeidungswirkung von Streckenbeeinflussungsanlagen²⁶⁵, zu denen das System gezählt werden kann.

5.3.2.3. Entwicklung der Marktdurchdringung

Das Moving Spot Light System ist derzeit in keinem Österreichischen Tunnel vorhanden, seine Durchdringungsrate ist gleich Null. Da es sich derzeit noch in Entwicklung befindet, ist davon auszugehen, dass diese Rate bis 2013 höchstens das Niveau *sehr niedrig* (5 %) erreicht. Sofern sich das System als wirksam erweist, wovon an dieser Stelle ausgegangen wird, könnte die Verbreitung bis 2018 *niedrig* (20 %) sein.

²⁶³ Fiat Engineering: Moving Spot Light System. Safe Tunnel, 1st Workshop, 12. Dezember, 2002, S. 8.

²⁶⁴ Shinar, D.; Shacham, M.: Evaluation of Different Methods for Keeping a Safe Headway in a Tunnel. Safe Tunnel, 1st Workshop, 12. Dezember 2002 in Turin.

²⁶⁵ Siegener, W.; Träger, K.; Martin, K. et al.: Unfallgeschehen im Bereich von Streckenbeeinflussungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Verkehrsbelastung. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.): Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 787, Bonn, 2000.

5.3.2.4. Kosten

Zu den Kosten eines Moving Spot Light Systems liegen keine Informationen vor. Eine grobe Abschätzung anhand der erforderlichen Komponenten, insbesondere zur fahrzeug-individuellen Steuerung, legt jedoch nahe, dass ein solches System pro Tunnel-km mit höheren Kosten verbunden ist als das System Section Control (siehe Kapitel 5.3.4). Es wird daher angenommen, dass die Investitionskosten das Doppelte des Betrags für Section Control (260.000 Euro/km) betragen, 520.000 Euro/km.²⁶⁶

In der Studie von Robatsch/Nussbaumer wurde das Unfallgeschehen in 99 Tunneln mit einer Strecke von 169 km untersucht. Da einige dieser Tunnel über zwei Röhren verfügen, beträgt die Gesamtlänge 221 km. Bei einer niedrigen Ausstattungsrate von 20 % im Jahr 2018 wären somit 44,2 km auszurüsten. Mit den zugrunde gelegten Kosten von 520.000 Euro/km und einem Kostenrückgang von 10 % innerhalb von zehn Jahren ergibt dies eine Investitionssumme von rd. 21,5 Millionen Euro. Details zu Kosten und Wirksamkeit des Systems sind im Anhang in Kapitel A2.3 dargestellt.

5.3.2.5. Wirksamkeit

Im Rahmen des Safe Tunnel-Projekts wurde die Wirksamkeit des Moving Spot Light Systems in einer Simulatorstudie untersucht. Dabei zeigte sich, dass sowohl die Wirksamkeit in Bezug auf das Abstandsverhalten als auch die Akzeptanz durch die Teilnehmer der Studie hoch waren. Der vorgegebene Abstand von 150 m zum vorausfahrenden Fahrzeug wurde von den Fahrern präzise und zuverlässig eingehalten, im Gegensatz zum Vergleichsszenario, in dem aufgemalte Linien am Fahrbahnrand bei der Einschätzung des Abstands unterstützen sollten.²⁶⁷

In der genannten Untersuchung zum Einfluss von Streckenbeeinflussungsanlagen auf die Verkehrssicherheit wurde gezeigt, dass die Inbetriebnahme solcher Anlagen in den untersuchten Fällen zu einem signifikanten Rückgang der Unfallrate führte, vorwiegend bei den Unfallursachen Geschwindigkeit und Abstand bei Unfällen im Längsverkehr. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass die Anlage vom Fahrer akzeptiert wird.²⁶⁸ Ist diese Voraussetzung gegeben, kann der Einsatz einer Streckenbeeinflussungsanlage zu einer signifikanten Reduzierung der Unfallrate von 22 bis 64 % führen. Das Ausmaß der Reduzierung hängt dabei von der Verkehrsbelastung auf dem betreffenden Streckenabschnitt sowie vom Sicherheitsniveau vor Inbetriebnahme der Anlage ab. Sie ist umso größer, je stärker die Verkehrsbelastung und je unfallträchtiger der Abschnitt vor Installation der Anlage war.²⁶⁹

²⁶⁶ Stefan, C.: Section Control. Automatic Speed Enforcement in the Kaisermühlen Tunnel Vienna, A22 Motorway. In: Bundesanstalt für Straßenwesen: ROSEBUD WP4 Final Report. Deliverable WP4, 2005. S. 24-43. S. 31.

²⁶⁷ Shinar, D.; Shacham, M.: Evaluation of Different Methods for Keeping a Safe Headway in a Tunnel. Safe Tunnel, 1st Workshop, 12. Dezember 2002 in Turin, S. 18-22.

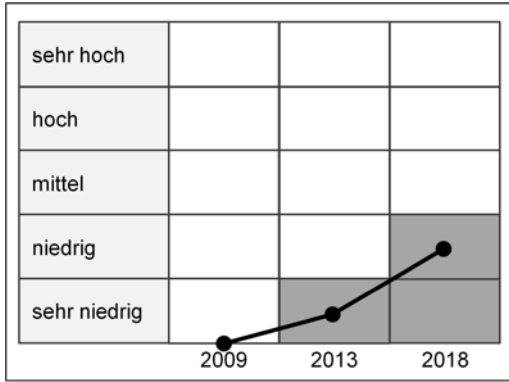
²⁶⁸ Siegener, W.; Träger, K.; Martin, K. et al.: Unfallgeschehen im Bereich von Streckenbeeinflussungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Verkehrsbelastung. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.): Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 787, Bonn, 2000, S. 80.

²⁶⁹ Siegener, W.; Träger, K.; Martin, K. et al., a. a. O., S. 99.

Auf Basis der genannten Studien wird für das Moving Spot Light System angenommen, dass 64 % der Auffahrunfälle vermieden werden können. Dieser Wert stellt das Maximum an Sicherheitsgewinn dar, das für Streckenbeeinflussungsanlagen ermittelt wurde. Er wird dadurch gerechtfertigt, dass bei diesem System eine fahrerindividuelle Unterstützung bei der Abstandshaltung erfolgt, wodurch ein größerer Effekt angenommen werden kann als bei einer kollektiven Maßnahme. Bis zum Jahr 2018 könnten unter den genannten Annahmen durch das Moving Spot Light System drei Getötete vermieden werden.

5.3.2.6. Zusammenfassung

Tabelle 20: Zusammenfassung Moving Spot Light System

Moving Spot Light System²⁷⁰	
Marktdurchdringung: <u>Legende</u> sehr niedrig: 0-5 % niedrig: 6-20 % mittel: 21-50 % hoch: 51-80 % sehr hoch: 81-100 %	
Kosten Tunnel:	520.000 €/km Rückgang um 10 % innerhalb von zehn Jahren → rd. 21,5 Millionen Euro von 2009 bis 2018
Kosten Pkw:	0 €
Wirksamkeit:	64 % der Auffahrunfälle → Vermeidung Getötete: 2009-2013: 0 (0,4) 2014-2018: 3 (2,7) gesamt: 3 (3,1)

5.3.3. I2C-Abstandswarnung

5.3.3.1. Systembeschreibung

Fahrzeugautonome Fahrerassistenzsysteme wurden in den vergangenen Jahren stetig weiterentwickelt und haben eine beachtliche Leistungsfähigkeit erreicht. Die Reichweite der verwendeten Umfeldsensoren stellt jedoch eine Limitierung dar, so dass als nächster Entwicklungsschritt kooperative Systeme gesehen werden, bei denen über eine drahtlose Kommunikationsverbindung Informationen zwischen Fahrzeugen und/oder der Infrastruktur ausgetauscht werden. Auf diese Weise könnte der „Sichtbereich“ der Systeme

²⁷⁰ Details siehe Anhang A2.3.

deutlich erhöht werden, was nach allgemeiner Auffassung mit einer Erhöhung der Verkehrssicherheit einhergeht.²⁷¹ Die größte Herausforderung von Systemen dieser Art besteht derzeit noch in der Entwicklung einheitlicher Systemarchitekturen und Standards für den Aufbau der Echtzeit-Kommunikationsverbindung und den Datenaustausch. Unterschiedliche Übertragungsmedien sind denkbar und am vielversprechendsten scheint die WLAN-Technologie auf Basis des IEEE 802.11p-Standards im 5,9 GHz-Bereich zu sein, der derzeit speziell für Car-to-x-Communication-Anwendungen entwickelt wird.²⁷²

Es gibt eine Vielzahl von Forschungsprojekten, die sich mit kooperativen Systemen beschäftigen, eines davon ist COOPERS, *Communication Technologies for Cooperative Systems*, das durch das CVIS Konsortium, *Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems* bearbeitet wird. Zu diesem Konsortium zählen insgesamt 60 Partner aus der Automobil- und Kommunikationsindustrie sowie Universitäten, Forschungsinstitute und staatliche Verkehrsbehörden aus ganz Europa.²⁷³

In Abbildung 15 ist der prinzipielle Systemaufbau zu sehen. Der betrachtete Streckenabschnitt wird in unterschiedliche Sektionen (vgl. S1 bis S4) eingeteilt, die jeweils mit sog. Road Side Units (RSU), d. h. stationären Kommunikationseinrichtungen ausgestattet werden. Der Operator verarbeitet die aus den Überwachungs- und Steuerungssystemen bereitgestellten Verkehrsinformationen und leitet die jeweils für eine Sektion relevanten Daten an die mit On Board Units (OBU) ausgerüsteten Fahrzeuge weiter.

Bei der Übertragung dieses Systemansatzes auf eine I2C-Abstandswarnung in Straßentunneln würde die Operator-Funktion durch die Tunnelleitzentrale übernommen und die Verkehrsüberwachungssysteme dazu genutzt, den Abstand zwischen den Fahrzeugen zu überwachen. Hierfür könnte die bei Autobahnbrücken übliche Messtechnik (VAMA, Videoabstandsmessanlage) oder Radarsensoren verwendet werden können.²⁷⁴ Eine Warnung, dass der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug zu gering ist, würde dann vom Operator bzw. der Tunnelleitzentrale über die Road Side Units an das betreffende Fahrzeug übertragen. Darüber hinaus bietet das System die Möglichkeit, nach dem Eintreten einer Kollision Fahrzeuge in nachgelagerten Sektionen zu warnen und so Sekundärkollisionen zu vermeiden.²⁷⁵

²⁷¹ Siehe z. B. Naab, K.: SIM-TD: Beschreibung der C2X-Funktionen. Deliverable D11.1, 2009, S. 69; oder SAFESPOT: Cooperative vehicles and road infrastructure for road safety. <http://www.safespot-eu.org>, abgerufen am 14. März 2010.

²⁷² Brignolo, R.: Infrastructure/Vehicle Communication. 2nd Symposium Safe and Reliable Tunnels - Innovative European Achievements, 30.-31. Mai 2006 in Lausanne, S. 4.

²⁷³ CVIS: Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems. <http://www.cvisproject.org/en/home.htm>, abgerufen am 18. April 2009.

²⁷⁴ ADAC: Abstandsmessungen. Mit Beteiligung der Sachverständigen Prof. Dr. Horst Groll und Dr.-Ing. Uwe Siart. http://www.adac.de/images/ADAC-Abstandsuntersuchung-Bericht-M%C3%A4rz08_tcm8-212335.pdf, abgerufen am 19. April 2009.

²⁷⁵ Stratil, H.: COOPERS - Co-operative Systems for Intelligent Road Safety. CVIS Cooperative Systems Workshop and Product Launch, 10.-11. Dezember 2008 in Berlin, S. 3.

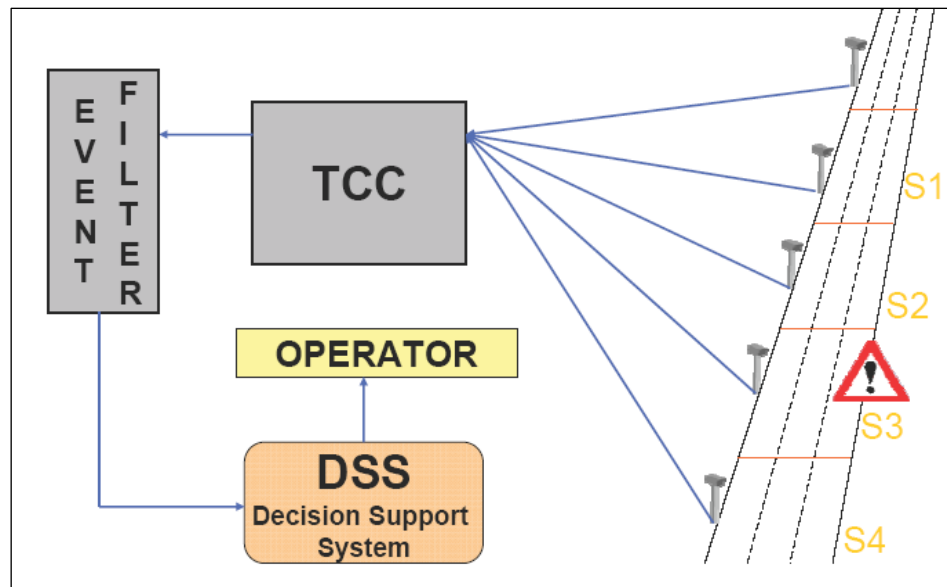


Abbildung 15: Systemaufbau COOPERS²⁷⁶

5.3.3.2. Ausgangslage

Im CVIS-Konsortium, welches das Projekt COOPERS bearbeitet, ist u. a. die Österreichische Straßenbau- und -betriebsgesellschaft ASFINAG vertreten. Ihre Aufgabe besteht darin, einen Prototyp des Systems zu implementieren. Die Teststrecke befindet sich auf der A12 in Tirol, zwischen Ampass und Vomp, und hat eine Länge von ca. 20 km.²⁷⁷ Im Januar und Februar 2010 fanden dort erste Testfahrten von insgesamt 50 Fahrern statt. Eine ausführliche Auswertung ist derzeit noch nicht verfügbar, doch laut einer Pressemitteilung der ASFINAG wurde eine hohe Nutzerakzeptanz ermittelt.²⁷⁸ Überlegungen, ein solches System in Straßentunneln zu implementieren bestehen derzeit nicht. Der Abschluss des Projekts ist für Mitte 2010 geplant.

5.3.3.3. Entwicklung der Marktdurchdringung

Im Hinblick auf die Entwicklung der Marktdurchdringung sind bei der I2C-Abstandswarnung zwei unterschiedliche Aspekte zu berücksichtigen: zum einen die Ergänzung der Tunnelinfrastruktur um die erforderlichen Kommunikations- und Überwachungssysteme, zum anderen die Verfügbarkeit der Empfangs- und Warneinrichtungen in den Fahrzeugen. Die Entwicklung der Marktdurchdringung hängt damit für diese Systeme nicht nur von den Fahrzeugherstellern und ihren Zulieferern ab, sondern ebenso von

²⁷⁶ Stratil, H.: COOPERS - Co-operative Systems for Intelligent Road Safety. CVIS Cooperative Systems Workshop and Product Launch, 10.-11. Dezember 2008 in Berlin, S. 3.

²⁷⁷ Meckel, P.: I2V Communication in Europe. The Implementation of COOPERS Services in Austria. ITS World Congress, 17.-20. Oktober 2008 in New York, S. 13.

²⁷⁸ ASFINAG: Die Straße spricht mit dem Fahrzeug und kommuniziert Informationen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit. Pressemitteilung zum Projekt COOPERS. <http://www.asfinag.at/index.php?module=Pagesetter&func=viewpub&tid=329&pid=22>, abgerufen am 14. März 2010.

den Verantwortlichen für die Verkehrsinfrastruktur. Aus diesem Grund ist nicht davon auszugehen, dass eine weite Verbreitung der Systeme vor 2020 erreicht werden kann.²⁷⁹

Zwischen 2004 und 2008 betrug der Anteil der Pkw-Neuzulassungen in Österreich pro Jahr durchschnittlich 7 % des Bestandes, siehe Anhang A1.2. Für den Betrachtungszeitraum wird angenommen, dass dieser Anteil konstant bleibt, ein I2C-fähiges Kommunikationssystem aber erst ab 2014 erhältlich sein wird. Bis dahin wird beispielsweise die Erprobung im Feldtest SIM-TD abgeschlossen sein²⁸⁰ und unter der Voraussetzung, dass die getesteten Systeme, u. a. ein kommunikationsbasierter Längsführungsassistent, die in sie gesetzten Erwartungen erfüllen, ist mit der Serieneinführung zu rechnen.

Für das Jahr 2014 wird ein Anteil von 5 % aller Neuwagen angenommen und für die darauffolgenden Jahre jeweils eine Steigerung um 5 %.²⁸¹ Damit ergibt sich die in Tabelle 21 gezeigte Abschätzung für die Entwicklung der Ausrüstungsrate.

Tabelle 21: Geschätzte Ausrüstungsrate von Pkw mit einem I2C-Abstandswarnsystem²⁸²

Jahr	Bestand	Zugang 7 % p.a.	Anteil Zugang mit I2C in %	Anteil ausge- rüstete Pkw am Bestand	Ausgerüstete Pkw kumuliert absolut	Anteil ausge- rüstete Pkw kumuliert in %
2009	4.584.950	320.947	0%	0,00%	0	0,0%
2010	4.905.897	343.413	0%	0,00%	0	0,0%
2011	5.249.309	367.452	0%	0,00%	0	0,0%
2012	5.616.761	393.173	0%	0,00%	0	0,0%
2013	6.009.934	420.695	0%	0,00%	0	0,0%
2014	6.430.630	450.144	5%	0,35%	22.507	0,4%
2015	6.880.774	481.654	10%	0,70%	70.673	1,0%
2016	7.362.428	515.370	15%	1,05%	147.978	2,0%
2017	7.877.798	551.446	20%	1,40%	258.267	3,3%
2018	8.429.244	590.047	25%	1,75%	405.779	4,8%

Für die Jahre 2009 bis 2013 beträgt die Durchdringungsrate damit null bzw. *sehr niedrig* und ebenso für 2018 mit rund 5 %. Werte dieser Größenordnung wurden z. B. im Projekt CODIA für verschiedene kooperative Systeme abgeschätzt.²⁸³

Die Ausrüstung der Tunnel könnte im Gegensatz zu den Fahrzeugen bereits heute beginnen, da die erforderlichen Systeme zur Verkehrsüberwachung und Sendung von Informa-

²⁷⁹ Wilmink, I.; Rämä, P.; Lind, G. et al.: eIMPACT: Impact Assessment of Intelligent Vehicle Safety Systems. Deliverable D4, 2008, S. 40.

²⁸⁰ Weiß, C.: Projekt "Sichere Intelligente Mobilität – Testfeld Deutschland". ETSI TC ITS Workshop, 4.-6. Februar 2009 in Sophia Antipolis, Frankreich, S. 10.

²⁸¹ Nöcker, G.; Mezger, K.; Kerner, B.: Vorausschauende Fahrerassistenzsysteme. Workshop Fahrerassistenzsysteme, 6.-8. April 2005 in Walting, S. 12.

²⁸² Eigene Berechnung auf Basis der Daten von Statistik Austria: Kfz-Bestand in Österreich 2004 bis 2008 sowie Kfz-Neuzulassungen in Österreich 2004 bis 2008.
http://www.statistik.at/web_de/statistiken/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge_-_neuzulassungen/020728.html,
http://www.statistik.at/web_de/statistiken/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge_-_bestand/020727.html, abgerufen am 5. Januar 2010.

²⁸³ Kulmala, R.; Leviäkangas, P.; Sihvola, N. et al.: CODIA: Co-Operative systems Deployment Impact Assessment. Final Study Report. Deliverable 5, 2008, S. 66-68.

tionen verfügbar sind. Auf diese Weise könnte bis 2013 bereits der Ausstattungsgrad *niedrig* (10 %) und bis 2018 *mittel* (25 %) erreicht werden. Relevant für die Wirksamkeit ist jedoch die kombinierte Ausstattungsrate von Tunnel und Fahrzeugen, d. h. die Wahrscheinlichkeit, dass ein ausgerüstetes Fahrzeug durch einen ausgerüsteten Tunnel fährt. Momentan kann davon ausgegangen werden, dass diese beiden Ausrüstungsraten unabhängig voneinander sind, und die verbundene Ausstattungsrate somit durch Multiplikation zu berechnen ist, siehe Tabelle 22. In Zukunft könnte diese Unabhängigkeit nicht mehr gegeben sein, wenn z. B. die Ausrüstungsrate der Fahrzeuge so hoch geworden ist, dass auch die Ausrüstung der Infrastruktur einschließlich der Tunnel als selbstverständlich vorausgesetzt wird. Davon ist jedoch im Betrachtungszeitraum nicht auszugehen.

Tabelle 22: Verbundene Ausstattungsrate der I2C-Abstandswarnung²⁸⁴

Jahr	Anteil ausgerüstete Pkw kumuliert in %	Anteil ausgerüsteter Tunnel kumuliert in %	Verbundene Ausstattungsrate für I2C-Abstandswarnung
2009	0,0%	0,0%	0,00%
2010	0,0%	2,5%	0,00%
2011	0,0%	5,0%	0,00%
2012	0,0%	7,5%	0,00%
2013	0,0%	10,0%	0,00%
2014	0,4%	13,0%	0,05%
2015	1,0%	16,0%	0,16%
2016	2,0%	19,0%	0,38%
2017	3,3%	22,0%	0,72%
2018	4,8%	25,0%	1,20%

5.3.3.4. Kosten

Voraussetzung für die I2C-Abstandswarnung sind fahrzeugseitig eine sog. On Board Unit (OBU) und eine Antenne, die im 5,9 GHz-Bereich Empfang und Verarbeitung von DSRC-Datenpaketen ermöglichen. Im Projekt COOPERS werden die Kosten für diese Ausrüstung mit ca. 200 € angegeben.²⁸⁵ Dies stimmt mit Schätzungen aus anderen Projekten überein.²⁸⁶ Für die Ausstattung des in Tabelle 21 genannten Anteils der Fahrzeugflotte entstünden somit bis 2018 Kosten in Höhe von insgesamt rd. 71 Millionen Euro, wenn ab der Markteinführung ein Kostenrückgang 30 % innerhalb von zehn Jahren angenommen wird.

In Bezug auf die erforderliche Infrastruktur wird im Projekt COOPERS angenommen, dass die fahrbahnüberspannenden Portale, ausgestattet mit Infrarot- und DSRC-Technik, zwischen 5.000 und 6.000 €/pro Stück kosten.²⁸⁷ Bei einem Abstand von 500 m entstehen somit Kosten von ca. 11.000 €/km. Weitere Kosten, die in COOPERS für die zentrale

²⁸⁴ Eigene Berechnung.

²⁸⁵ Fuchs, S.; Bankosegger, D.; Sladek, O. et al.: COOPERS: Market and User Assessment. Deliverable D11-B-IR 2600/2700-2, 2007, S. 65.

²⁸⁶ Siehe z. B. Moro, C.: COME2REACT Business Exploitation Model. Cooperative Communication System to Enhanced Safety and Efficiency in European Road Transport. Project Presentation, 26. Oktober 2007 in Paris, S. 12.

²⁸⁷ Fuchs, S.; Bankosegger, D.; Sladek, O. et al., a. a. O., S. 67.

Steuerung angenommen werden, sind nicht zu berücksichtigen, da diese Aufgabe von der Tunnelleitzentrale übernommen wird. Es wird daher davon ausgegangen, dass für diesen Teil des Systems keine zusätzlichen Kosten entstehen. Die gesamte Länge aller Röhren der hier betrachteten Tunnel beträgt 221 km. Für die angenommenen 55 km, die bis zum Jahr 2018 ausgerüstet werden könnten, entstünden unter der Voraussetzung eines Rückgangs um 10 % in zehn Jahren, Kosten von rd. 573.000 €. Details zu Kosten und Wirksamkeit sind im Anhang in Kapitel A2.4 zu finden.

5.3.3.5. Wirksamkeit

Fahrzeugsicherheitssysteme auf Basis von C2C- oder C2I-Kommunikation werden derzeit in einer Vielzahl von Projekten intensiv erforscht, sowohl in Europa als auch in Japan und den USA. Eine Übersicht zeigt Abbildung 16, die jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.

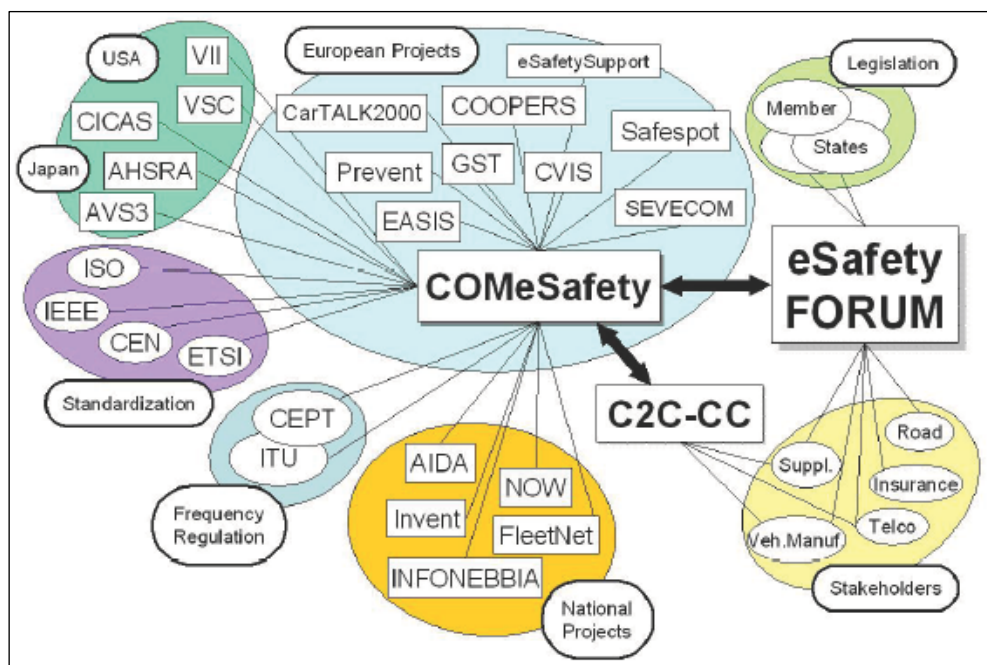


Abbildung 16: Projekte zur Erforschung von C2C- und C2I-Kommunikationssystemen²⁸⁸

Trotz dieser Vielzahl an Projekten und Initiativen sind quantitative Aussagen über den erwarteten Nutzen von kommunikationsbasierten Sicherheitssystemen kaum zu erlangen. Der Schwerpunkt der Forschungsvorhaben liegt auf der Entwicklung der erforderlichen Technologien, Protokolle und Standards sowie dem Thema Datensicherheit. Der Mehrwert der kooperativen Systeme wird darin gesehen, dass sie dem Fahrzeug bzw. dem Fahrer mehr Informationen zur Verfügung stellen als dies allein mit fahrzeugautonomen Systemen möglich ist. Auf diese Weise sollen die Grenzen der derzeitigen Fahrerassistenzsysteme, die z. B. in einer beschränkten Sensorreichweite bestehen, überwunden und der

²⁸⁸ COMeSafety: A EU Specific Support Activity. http://comesafety.org/uploads/media/COMeSafety_DEL_D02_Project_Presentation_01.pdf, abgerufen am 9. Januar 2010, S. 11.

Wirkungsbereich erweitert werden.²⁸⁹ Im Hinblick auf den zu erwartenden Nutzen der Systeme wird meist pauschal von einer Verbesserung des Status quo ausgegangen, ohne diesen zu quantifizieren.^{290, 291}

Eine Ausnahme bildet das Projekt CODIA, *Co-Operative Systems Deployment Impact Assessment*, das explizit zum Ziel hatte, eine unabhängige, quantitative Bewertung der direkten und indirekten Auswirkungen kooperativer Systeme durchzuführen. Untersucht wurden nach Vorgabe der Europäischen Kommission die Systeme: Dynamic Speed Adaptation (C2I), Reversible Lanes Due to Traffic Flow (C2I), Local Danger/Hazard Warning (C2C) und Post Crash Warning (C2C).²⁹² Leider ist diese Auswahl jedoch nicht für eine Abschätzung der Wirksamkeit des hier betrachteten Systems geeignet.

Das gleiche gilt für die im Rahmen des VSC-Projekts, *Vehicle Safety Communications*, in den USA erfolgte Nutzenberechnung, die nur eine relative Abschätzung der unterschiedlichen kooperativen Systeme zum Inhalt hatte. Im Abschlussbericht sind die zugrunde gelegten Daten nicht zu finden, sondern nur das resultierende relative Ranking der Systeme.²⁹³ Es ist zu erwarten, dass diese Methode auch im Nachfolgeprojekt VSC-A, *Vehicle Safety Communications – Applications*,²⁹⁴ zur Anwendung kommt, der entsprechende Bericht wurde bislang nicht veröffentlicht. Eine im Projekt COOPERS geplante Abschätzung der Sicherheitswirkung liegt derzeit ebenfalls noch nicht vor.²⁹⁵

Aufgrund dieses Mangels an Daten ist es erforderlich, eigene Annahmen und Abschätzungen in Bezug auf die Wirksamkeit der hier angenommenen I2C-Abstandswarnung zu treffen. Bei diesem System erhält der Fahrer, ebenso wie bei Moving Spot Light System und Intelligent Speed Adaptation, eine auf die aktuelle Situation angepasste Information zu seinem Fahrverhalten. Im Gegensatz zur hier betrachteten Variante von Intelligent Speed Adaptation erfolgt allerdings kein Eingriff. Dies spricht dafür, dass die Wirksamkeit der I2C-Abstandswarnung geringer ist als von Intelligent Speed Adaptation, zumal in beiden Fällen davon ausgegangen werden kann, dass ein Deaktivieren des Systems durch den Fahrer möglich ist.

Das Moving Spot Light System übermittelt ebenfalls eine Information bezüglich des Abstandsverhaltens an den Fahrer. Im Gegensatz zur I2C-Abstandswarnung erfolgt die Darstellung aber nicht innerhalb des Fahrzeugs, sondern außerhalb, an der Wand des Tunnels. Es kann angenommen werden, dass eine Darstellung innerhalb des Fahrzeugs zu

²⁸⁹ CAMP Vehicle Safety Communications Consortium: Vehicle Safety Communications Project (VSC) Task 3 Final Report. Identify Intelligent Vehicle Safety Applications Enabled by DSRC. DOT HS 809 859. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, 2006, S. 22.

²⁹⁰ COMeSafety: Newsletter for European ITS Related Research Projects. Issue 6, 2008, S. 4: „Although it is obvious that C2X can improve safety, efficiency and comfort the obstacle of market introduction and penetration has not yet been overcome.“

²⁹¹ Naab, K.: simTD: Beschreibung der C2X-Funktionen. Deliverable D11.1, 2009, S. 69. „Eine Sicherheitswirkung ist zu erwarten.“

²⁹² Kulmala, R.; Leviäkangas, P.; Sihvola, N. et al.: CODIA: Co-Operative systems Deployment Impact Assessment. Final Study Report. Deliverable 5, 2008.

²⁹³ CAMP Vehicle Safety Communications Consortium, a. a. O., S. 47.

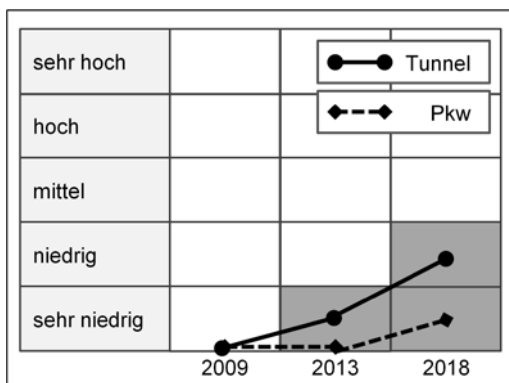
²⁹⁴ Ahmed-Zaid, F.; Bai, F.; Basnayake, C. et al.: Vehicle Safety Communications - Applications (VSC-A). DOT HS 811 073. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, 2008.

²⁹⁵ Siehe Übersicht der Public Deliverables auf der Projekt-Website. COOPERS: Co-operative Systems for Intelligent Road Safety. <http://www.coopers-ip.eu>, abgerufen am 23. Januar 2010.

einer höheren Wirksamkeit führt. Gleichzeitig liefert das Moving Spot Light System allerdings mit Hilfe des durchgehenden LED-Bandes eine kontinuierliche Information, während beim kooperativen System nur beim Passieren der Portale eine Warnung möglich ist. Nach Abwägung dieser Eigenschaften wird angenommen, dass durch die I2C-Abstandswarnung 60 % der Auffahrunfälle vermieden werden können. Aufgrund der geringen verbundenen Ausstattungsrate, die sich bis 2018 erzielen lässt, ist allerdings nicht damit zu rechnen, dass durch die I2C-Abstandswarnung eine Verringerung der Zahl der Getöteten erreicht wird.

5.3.3.6. Zusammenfassung

Tabelle 23: Zusammenfassung I2C-Abstandswarnung

I2C-Abstandswarnung ²⁹⁶													
Marktdurchdringung: <u>Legende</u> sehr niedrig: 0-5 % niedrig: 6-20 % mittel: 21-50 % hoch: 51-80 % sehr hoch: 81-100 %	 <table><caption>Estimated Market Penetration Data</caption><thead><tr><th>Jahr</th><th>Tunnel</th><th>Pkw</th></tr></thead><tbody><tr><td>2009</td><td>sehr niedrig</td><td>sehr niedrig</td></tr><tr><td>2013</td><td>niedrig</td><td>sehr niedrig</td></tr><tr><td>2018</td><td>niedrig</td><td>mittel</td></tr></tbody></table>	Jahr	Tunnel	Pkw	2009	sehr niedrig	sehr niedrig	2013	niedrig	sehr niedrig	2018	niedrig	mittel
Jahr	Tunnel	Pkw											
2009	sehr niedrig	sehr niedrig											
2013	niedrig	sehr niedrig											
2018	niedrig	mittel											
Kosten Tunnel:	11.000 €/km Rückgang um 10 % innerhalb von zehn Jahren → rd. 573.000 Euro von 2009 bis 2018												
Kosten Pkw:	200 €/Pkw Rückgang um 30 % innerhalb von zehn Jahren → rd. 71 Millionen Euro von 2009 bis 2018												
Wirksamkeit:	60 % der Auffahrunfälle → Vermeidung Getötete: 2009-2013: 0 (0) 2014-2018: 0 (0,1) gesamt: 0 (0,1)												

²⁹⁶ Details siehe Anhang A2.4.

5.3.4. Section Control

5.3.4.1. Systembeschreibung

Das Prinzip von Section Control²⁹⁷ besteht darin, die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs nicht an einem bestimmten Punkt durch Radar- oder Lasermessung zu erfassen, sondern die Durchschnittsgeschwindigkeit über eine längere Strecke zu ermitteln. Der Vorteil dieser Methode ist, dass die Fahrer nicht nur in unmittelbarer Nähe einer (bekannten) Kontrollstelle die Höchstgeschwindigkeit einhalten, sondern gezwungen sind, dies über längere Abschnitte zu tun. Nach einer Untersuchung der Unfallforschung der Versicherer (UDV) beschränkt sich die Wirkung stationärer Geschwindigkeitskontrollen auf nur etwa 300 m.²⁹⁸ Section Control wurde zuerst in den Niederlanden implementiert, die Pilotanlage auf der A2 zwischen Utrecht und Amsterdam entstand 1997. Seither wurde das System u. a. in Großbritannien, Italien, Österreich und Australien eingeführt.

Zur erforderlichen Ausrüstung von Section Control zählen Videokameras, mit denen die Fahrzeuge bei der Einfahrt in die überwachte Strecke erfasst werden. Eine automatische Bildauswertung registriert das Kennzeichen des Fahrzeugs, was erforderlich ist, um es am Ende der Strecke wieder zu identifizieren. Die Zeitdifferenz zwischen Ein- und Ausfahrt aus der überwachten Strecke wird zur Berechnung der Durchschnittsgeschwindigkeit genutzt.²⁹⁹ Ist die Durchschnittsgeschwindigkeit eines erfassten Fahrzeugs höher als die zulässige Höchstgeschwindigkeit, wird das Kennzeichen nicht gelöscht, sondern zur Ausstellung des Bußgeldbescheids an die entsprechende Behörde weitergeleitet.

5.3.4.2. Ausgangslage

Section Control ist in Österreich derzeit im Ehrentalerbergtunnel (A2; 3,3 km) und im Kaisermühlentunnel³⁰⁰ (A22; 2,2 km) installiert. Darüber hinaus kommt das System bei längerfristigen Baustellen auf Autobahnen zum Einsatz, so z. B. seit Dezember 2009 auf der A8 auf 9 km Länge zwischen Pichl und Meggenhofen. Nach Abschluss der Bauarbeiten Ende 2010 wird die Anlage dort wieder demontiert werden.³⁰¹

²⁹⁷ Das System wird auch als Integrale Geschwindigkeitsmessung, Point to Point Control, Point to Point Speed Enforcement, Time over Distance Cameras, Average Speed Enforcement, Trajectory Control oder „Tutor“ (Italien) bezeichnet.

²⁹⁸ Schmidt-Kasperek, U.; Anzenberger, T.: Überwachungs-Marathon. Stern 46, 2008, S. 166.

²⁹⁹ Ludwig, O.: Section Control. 3. Internationaler Fachkongress Verkehr und Sicherheit in Straßentunneln, 18.-20. Mai 2005 in Hamburg.

³⁰⁰ Stefan, C.: Automatic Speed Enforcement on the A13 Motorway (NL). In: Bundesanstalt für Straßenwesen: ROSEBUD WP4 Final Report. Deliverable WP4, 2005. S. 44-52.

³⁰¹ Österreichischer Automobil- Motorrad- und Touring Club (ÖAMTC): Section Control-Anlagen in Österreich. <http://www.oeamtc.at/netautor/pages/resshp/anwendg/1103906.html>, abgerufen am 22. November 2009.

5.3.4.3. Entwicklung der Marktdurchdringung

Basis der Unfallanalyse von Robatsch/Nussbaumer sind 99 Tunnel, so dass die Ausrüstung von bislang zwei Tunneln einem Anteil von 3,6 % entspricht und in die Kategorie *sehr niedrig* fällt. Die positive Wirkung des Systems auf die Einhaltung der Geschwindigkeitsgebote und die Unfallhäufigkeit konnte in ersten Studien jedoch nachgewiesen werden.³⁰² Es ist daher zu erwarten, dass sich das System weiter verbreiten wird, wofür auch der temporäre Einsatz im Baustellenbereich spricht. Es wird angenommen, dass bis zum Jahr 2013 20 % und bis zum Jahr 2018 50 % der Tunnel ausgestattet sein könnten. Dies entspricht einer *niedrigen* bzw. *mittleren* Ausstattungsrate. Im Gegensatz zum Moving Spot Light System wird die Verbreitung von Section Control auf die Anzahl der Tunnel und nicht auf den Anteil an Tunnelstrecke bezogen, da die Länge des Tunnels nicht relevant ist.

5.3.4.4. Kosten

Die Kosten für die Ausrüstung des Kaisermühlentunnels mit Section Control betrugen 1,2 Millionen Euro, was einem Betrag von 600.000 € pro Röhre entspricht. Die 99 betrachteten Tunnel haben insgesamt 154 Röhren, so dass der Gesamtinvestitionsbedarf 92,4 Millionen Euro beträgt. Unter der Annahmen, dass bis 2018 25 % der Tunnel ausgerüstet werden können, und dass die Systemkosten um 10 % innerhalb von zehn Jahren sinken, ergeben sich Kosten von rd. 20 Millionen Euro. In Anhang-Kapitel A2.5 sind Details zur Berechnung von Kosten und Wirksamkeit angegeben.

5.3.4.5. Wirksamkeit

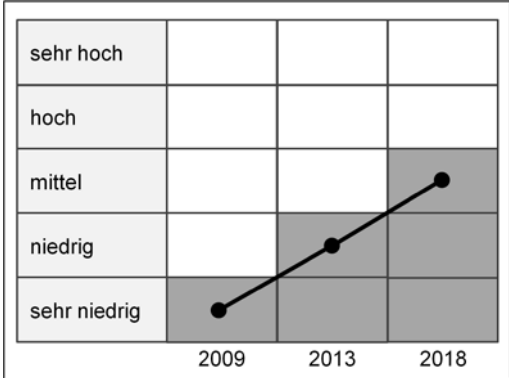
Im ersten Jahr nach Installation von Section Control im Kaisermühlentunnel reduzierte sich bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h die Durchschnittsgeschwindigkeit von 85 km/h auf 75 km/h. Der Anteil der Fahrer, die den Tunnel zu schnell passierten, betrug nur 0,14 %. Eine Abschätzung auf Basis dieser Daten ergab, dass durch Section Control 66 % der Unfälle, die Todesfälle oder Schwerverletzte zur Folge haben, vermieden werden. Ein ähnlicher Wert, 65 %, wurde als durchschnittlicher Rückgang für elf Anlagen in Nottinghamshire, England, ermittelt.³⁰³ Es wird daher im Rahmen dieser Arbeit 66 % für die Wirksamkeit einer Section Control-Anlage angenommen. Auf Basis dieser Annahmen könnten bis 2018 drei Getötete vermieden werden.

³⁰² Stefan, C.: Section Control. Automatic Speed Enforcement in the Kaisermühlen Tunnel Vienna, A22 Motorway. In: Bundesanstalt für Straßenwesen: ROSEBUD WP4 Final Report. Deliverable WP4, 2005. S. 24-43.

³⁰³ Simcic, G.: Section Control: Towards a More Efficient and Better Accepted Enforcement of Speed Limits? In: European Transport Safety Council (Hrsg.): Speed Fact Sheet Nr. 5, 2009, S. 2.

5.3.4.6. Zusammenfassung

Tabelle 24: Zusammenfassung Section Control

Section Control ³⁰⁴	
Marktdurchdringung: <u>Legende</u> sehr niedrig: 0-5 % niedrig: 6-20 % mittel: 21-50 % hoch: 51-80 % sehr hoch: 81-100 %	
Kosten Tunnel:	600.000 €/Tunnelröhre Rückgang um 10 % innerhalb von zehn Jahren → rd. 20 Millionen Euro von 2009 bis 2018
Kosten Pkw:	0 €
Wirksamkeit:	65 % der Alleinunfälle → Vermeidung Getötete: 2009-2013: 1 (0,8) 2014-2018: 3 (2,5) gesamt: 3 (3,3)

5.3.5. Intelligent Speed Adaptation

5.3.5.1. Systembeschreibung

Unter der Bezeichnung Intelligent Speed Adaptation (ISA) werden eine Reihe von Systemen erforscht, die für die Einhaltung der vorgeschriebenen Höchstgeschwindigkeit oder die situationsabhängige Anpassung der Geschwindigkeit sorgen. Unterschieden werden dabei die folgenden Systemvarianten³⁰⁵:

- **Advisory ISA / Speed Alerting**

Bei Advisory ISA oder Speed Alerting handelt es sich um ein Informations- und Warnsystem, bei dem der Fahrer über die aktuell gültig Höchstgeschwindigkeit informiert wird und eine Warnung erhält, wenn er sie überschreitet. Diese Funktion ist durch Navigationssysteme bereits weit verbreitet.

- **Voluntary ISA / Speed Limiting**

Beim Speed Limiting wird die Information über die aktuell gültige Höchstgeschwindigkeit ins Fahrzeug übertragen und das System verhindert, dass es über

³⁰⁴ Details siehe Anhang A2.5.

³⁰⁵ Carsten, O.; Fowkes, M.: External Vehicle Speed Control: Executive Summary of Project Results. Deliverable EVSC-Exec3, 2000, S. 2.

diese Geschwindigkeit hinaus beschleunigt werden kann. Beim Voluntary ISA kann der Fahrer jedoch selbst entscheiden, ob er das System aktiviert oder nicht. Bei den meisten beschriebenen Systemvarianten hat er außerdem die Möglichkeit, die Geschwindigkeitsvorgabe des Systems zu übersteuern. Dies kann entweder durch ein Durchtreten des Gaspedals oder die Betätigung eines Notfallknopfes umgesetzt werden.

- **Mandatory ISA / Compulsory ISA / Speed Limiting**

Speed Limiting in der Mandatory- oder Compulsory-Variante greift ebenfalls direkt in die Geschwindigkeitsregelung des Fahrzeugs ein. Der Fahrer hat hier jedoch keine Wahlmöglichkeit, denn das System kann nicht übersteuert oder deaktiviert werden.

- **Recording System**

In wenigen Fällen wird ein aufzeichnendes System beschrieben, bei dem das Geschwindigkeitsverhalten des Fahrers permanent registriert wird. Diese Informationen können vom Fahrer selbst genutzt werden, aber auch von der Polizei, bei Berufsfahrern vom Arbeitgeber etc.³⁰⁶

Alle Varianten setzen voraus, dass das System Daten über die jeweils gültige Höchstgeschwindigkeit zur Verfügung hat. Dies kann entweder durch Datenübertragung lokaler Infrastruktur erfolgen, wie zum Beispiel am Straßenrand aufgestellte Funkbaken, oder über digitale Karten wie sie Navigationssysteme nutzen, welche die notwendigen Geschwindigkeitsinformationen beinhalten. In letzterem Fall wird das Navigationssystem außerdem dazu genutzt, die Position des Fahrzeugs und seine aktuelle Geschwindigkeit zu bestimmen. Bei der infrastrukturgestützten Variante müssen diese Daten entweder durch infrastrukturseitige Überwachungssysteme erfasst oder vom Fahrzeug an die Infrastruktur übertragen werden.^{307, 308}

Je nach Art der Geschwindigkeitsbegrenzung, die vom System herangezogen wird, kann eine weitere Unterscheidung der Systeme vorgenommen werden. Es kann sich dabei um eine fixe Vorgabe handeln, bei der die auf dem jeweiligen Streckenabschnitt durch dauerhaft installierte Schilder ausgewiesene Höchstgeschwindigkeit als Richtgröße dient. Oder das System berücksichtigt variable örtliche Vorgaben, wie z. B. in Baustellen oder in der Nähe von Fußgängerüberwegen und Schulen. Eine dritte Möglichkeit stellen dynamische Vorgaben dar, bei denen z. B. auch das Wetter, Unfälle oder zeitliche Unterschiede (erhöhtes Schüleraufkommen zu Beginn und am Ende des Schultags) eingehen.³⁰⁹

Die Beschränkung der Fahrzeuggeschwindigkeit kann auf unterschiedliche Weisen erfolgen. Überwiegend wurden in Feldtests Fahrzeuge mit sog. haptischem Gaspedal verwen-

³⁰⁶ Jamson, S.; Carsten, O.; Chorlton, K. et al.: Intelligent Speed Adaptation: Literature Review and Scoping Study. Deliverable ISA-TfL D1, 2006, S. 7.

³⁰⁷ Young, K.; Regan, M.: Intelligent Speed Adaptation: A Review. Australasian Road Safety Research, Policing and Education Conference. Sydney, 2002. S. 445.

³⁰⁸ eSafety Forum: Final Report and Recommendations of the Implementation Road Map Working Group. Brüssel, 2005, S. 10.

³⁰⁹ Carsten, O.; Fowkes, M.: External Vehicle Speed Control: Executive Summary of Project Results. Deliverable EVSC-Exec3, 2000, S. 2.

det, dessen Charakteristik bei Annäherung an die zulässige Höchstgeschwindigkeit immer steifer wird und nur durch ein bewusstes, schnelles Durchtreten eine weitere Beschleunigung ermöglicht. Diese Variante wird gegenüber einem Bremseneingriff aus Sicherheitsgründen bevorzugt. Daneben gibt es die Möglichkeit, die Fahrzeuggeschwindigkeit durch einen Eingriff ins Motormanagement zu begrenzen.³¹⁰

5.3.5.2. Ausgangslage

In Österreich wird ein Speed Limiting ISA bisher nicht genutzt, weder in Tunneln noch auf freier Strecke. Schweden³¹¹, die Niederlande, Dänemark und Großbritannien nehmen in Europa eine Vorreiterrolle ein und haben unterschiedliche Systemvarianten in mehreren Forschungsinitiativen untersucht. Erste Feldversuche wurden 1992 in Schweden durchgeführt und seither gab es mehrere EU-geförderte Projekte zu diesem Thema.^{312,313} Die Verfügbarkeit preisgünstiger Navigationssystemen hat dafür gesorgt, dass Speed Alerting Systeme inzwischen relativ weit verbreitet sind. Speed Limiting Systeme befinden sich dagegen weiterhin im Forschungsstadium. Zwar müssen bereits seit 1992 neue Lkw und Busse und seit 2002 auch leichte Nutzfahrzeuge in der EU mit einem Geschwindigkeitsbegrenzer ausgestattet sein, doch dabei handelt es sich um eine permanente Drosselung, die dafür sorgt, dass Lkw nicht dauerhaft über 90 km/h bzw. Busse über 100 km/h fahren können.³¹⁴

Für die Unfallvermeidung in Straßentunneln bietet sich eine infrastrukturgestützte Version von Intelligent Speed Adaptation an. Es wird von einem Compulsory ISA-System ausgegangen, bei dem die Überschreitung der Höchstgeschwindigkeit durch einen Eingriff ins Motormanagement des Fahrzeugs verhindert wird. Der Fahrer kann das System jedoch übersteuern, falls erforderlich. Ein solches System war u. a. Gegenstand einer Feldstudie in den Niederlanden.³¹⁵

Eine solche Möglichkeit zur Übersteuerung des Eingriffs ist aus mehreren Gründen erforderlich. Zum einen ist ein nicht übersteuerbarer Eingriff nach momentaner Rechtslage unzulässig, sofern er nicht wie im Falle von ABS und ESP erst dann einsetzt, wenn der Fahrer aufgrund seiner begrenzten Reaktionsfähigkeit gar nicht mehr in der Lage wäre, zu reagieren. In diesem Fall wird vorausgesetzt, dass die Vermeidung oder Folgenminderung

³¹⁰ Jamson, S.; Carsten, O.; Chorlton, K. et al.: Intelligent Speed Adaptation: Literature Review and Scoping Study. Deliverable ISA-TfL D1, 2006, S. 6.

³¹¹ Der bislang umfangreichste ISA-Feldtest wurde in Schweden durchgeführt: Swedish National Road Administration: Results of the World's Largest ISA Trial. Publikation Nr. 2002:96. Borlänge, 2002.

³¹² Paine, M.; Paine, D.; Griffiths, M. et al.: In-Vehicle Intelligent Speed Advisory Systems. 20th International Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, 18.-21. Juni 2007 in Lyon, S. 13.

³¹³ Grunnan, T.; Vaa, T.; Ulleberg, P. et al.: Implications of Innovative Technology for the Key Areas in Traffic Safety: Speed, Drink Driving and Restraint Systems. Deliverable 10, Final Report, 2008, S. 54.

³¹⁴ N. N.: Richtlinie 2002/85/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. November 2002 zur Änderung der Richtlinie 92/6/EWG des Rates über Einbau und Benutzung von Geschwindigkeitsbegrenzern für bestimmte Kraftfahrzeugklassen in der Gemeinschaft. In: Amtsblatt der Europäischen Union vom 04. Dezember 2002. S.8-9.

³¹⁵ Dutch Ministry of Transport: ISA Tilburg, Field Experiment Intelligent Speed Adaptation. Final Report. Rotterdam, 2001. Nach: Oei, H. L.; Polak, P. H.: Intelligent Speed Adaptation and Road Safety. In: IATSS Research Vol. 26 Nr. 2, 2002, S. 48.

eines Unfalls höher zu werten ist als die Autonomie des Fahrers. Bei einem eingreifenden ISA-System befindet sich der Fahrer jedoch nicht in einem von ihm nicht mehr beherrschbaren Grenzbereich kurz vor Eintreten eines Unfalls und würde durch einen nicht übersteuerbaren Eingriff unzulässig in der Beherrschung des Fahrzeugs, die das Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr vorschreibt³¹⁶, eingeschränkt.³¹⁷ Zum anderen besteht die Gefahr, dass durch nicht übersteuerbare Eingriffe neue Risiken im Straßenverkehr entstehen, die sich im Hinblick auf die Verkehrssicherheit kontraproduktiv auswirken. Dies könnte bspw. bei Überholvorgängen der Fall sein.

5.3.5.3. Entwicklung der Marktdurchdringung

Die Komponenten für die Umsetzung von Intelligent Speed Adaptation im Fahrzeug sind durch die langjährigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten am Markt verfügbar. Das Unternehmen Automated Control Systems (ACS) aus Melbourne bietet bspw. ein System namens *Speedshield* zur aktiven Geschwindigkeitskontrolle an, das seit 2003 von mehreren australischen Unternehmen genutzt wird, um die Geschwindigkeit von Staplern und ähnlichen Fahrzeugen in Lagerhäusern zu regulieren. Das System wurde außerdem 2006 in Projekten der Transport Accident Commission of Victoria und dem Office of Road Safety of Western Australia in Pkw und Lkw eingesetzt. Es nutzt ein aktives Gaspedal, um ein Fahren oberhalb der erlaubten Höchstgeschwindigkeit zu verhindern, und kann optional übersteuerbar oder nicht-übersteuerbar gestaltet werden.³¹⁸ Auch die Möglichkeit, die Geschwindigkeit über einen Eingriff ins Motormanagement zu begrenzen, ist vorhanden. Voraussetzung dafür ist, dass die Drosselklappe elektronisch angesteuert wird, was heute in nahezu allen Neuwagen der Fall ist.³¹⁹ Die technischen Voraussetzungen für die Anwendungen von Intelligent Speed Adaptation sind somit gegeben und das System könnte in kurzer Zeit in Fahrzeugen verfügbar sein.

Wie in Kapitel 5.3.3.3 erläutert, wird davon ausgegangen, dass in Österreich pro Jahr 7 % an Neufahrzeugen zur Flotte hinzukommen. Es wird weiterhin angenommen, dass bereits 2010 1 % der Neufahrzeuge mit Intelligent Speed Adaptation ausgestattet sind. Dieser Anteil steigert sich 2011 auf 5 % der Neufahrzeuge und nimmt im Folgenden um 5 % pro Jahr zu. Tabelle 25 zeigt, dass die kumulierte Ausrüstungsrate im Jahr 2013 unter diesen Voraussetzungen 2,1 % und im Jahr 2018 10,9 % beträgt. Der Anteil der ausgerüsteten Fahrzeuge im Bestand fällt damit in die Kategorien *sehr niedrig* bzw. *niedrig*.

³¹⁶ United Nations Economic Commission for Europe, Inland Transport Committee: Convention on Road Traffic. Wien, 1968.

³¹⁷ Seeck, A.; Gasser, T. M.: Klassifizierung und Würdigung der rechtlichen Rahmenbedingungen im Zusammenhang mit der Einführung moderner FAS. Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz, 04.-05. April 2006 in Garching, S. 2.

³¹⁸ Paine, M.; Paine, D.; Griffiths, M. et al.: In-Vehicle Intelligent Speed Advisory Systems. 20th International Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, 18.-21. Juni 2007 in Lyon, S. 9. Siehe auch www.speedshield.com, abgerufen am 05. Januar 2010.

³¹⁹ Jamson, S.; Carsten, O.; Chorlton, K. et al.: Intelligent Speed Adaptation: Literature Review and Scoping Study. Deliverable ISA-TfL D1, 2006, S. 63.

Tabelle 25: Geschätzte Ausrüstungsrate von Pkw mit Intelligent Speed Adaptation³²⁰

Jahr	Bestand	Zugang 7 % p.a.	Anteil Zugang mit ISA in %	Anteil ausge- rüstete Pkw am Bestand	Ausgerüstete Pkw kumuliert absolut	Anteil ausge- rüstete Pkw kumuliert in %
2009	4.584.950	320.947	0%	0,00%	0	0,0%
2010	4.905.897	343.413	1%	0,07%	3.434	0,1%
2011	5.249.309	367.452	5%	0,35%	21.807	0,4%
2012	5.616.761	393.173	10%	0,70%	61.124	1,1%
2013	6.009.934	420.695	15%	1,05%	124.228	2,1%
2014	6.430.630	450.144	20%	1,40%	214.257	3,3%
2015	6.880.774	481.654	25%	1,75%	334.671	4,9%
2016	7.362.428	515.370	30%	2,10%	489.282	6,6%
2017	7.877.798	551.446	35%	2,45%	682.288	8,7%
2018	8.429.244	590.047	40%	2,80%	918.307	10,9%

Für die Entwicklung der Ausstattungsrate von Tunneln mit Intelligent Speed Adaptation wird mit einem ähnlichen Verlauf wie für Section Control gerechnet, mit dem Unterschied, dass der Startpunkt bei null liegt. Bis zum Jahr 2013 könnten 10 %, bis zum Jahr 2018 25 % der betrachteten Tunnel ausgerüstet sein.

Die Wirksamkeit von Intelligent Speed Adaptation ist nur dann gegeben, wenn ein ausgerüstetes Fahrzeug durch einen ausgerüsteten Tunnel fährt. Relevant ist daher die verbundene Ausstattungsrate der beiden Komponenten, die man durch Multiplikation der Werte aus der Einzelbetrachtung erhält.³²¹ Auf diese Weise ergibt sich die in Tabelle 26 dargestellte Entwicklung der verbundenen Ausstattungsrate.

Tabelle 26: Verbundene Ausstattungsrate von Intelligent Speed Adaptation³²²

Jahr	Anteil ausgerüstete Pkw kumuliert in %	Anteil ausgerüsteter Tunnel kumuliert in %	Verbundene Ausstattungs- rate für ISA
2009	0,0%	0,0%	0,00%
2010	0,1%	2,5%	0,00%
2011	0,4%	5,0%	0,02%
2012	1,1%	7,5%	0,08%
2013	2,1%	10,0%	0,21%
2014	3,3%	13,0%	0,43%
2015	4,9%	16,0%	0,78%
2016	6,6%	19,0%	1,26%
2017	8,7%	22,0%	1,91%
2018	10,9%	25,0%	2,72%

³²⁰ Eigene Berechnung auf Basis der Daten von Statistik Austria: Kfz-Bestand in Österreich 2004 bis 2008 sowie Kfz-Neuzulassungen in Österreich 2004 bis 2008.

http://www.statistik.at/web_de/statistiken/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge_-_neuzulassungen/020728.html,
http://www.statistik.at/web_de/statistiken/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge_-_bestand/020727.html, abgerufen
am 5. Januar 2010.

³²¹ Vgl. Kapitel 5.3.3.5.

³²² Eigene Berechnung.

5.3.5.4. Kosten

Die Kosten für das o.g. System *Speedshield* betragen 2.000 US\$, was ca. 1.400 € entspricht.^{323,324} In einer Studie unter der Leitung der University of Leeds, in der die Einführung von Intelligent Speed Adaptation in London untersucht wurde, wird ein Preis von 1.800 € pro Fahrzeug angenommen,³²⁵ eine schwedische Studie schätzt 2.200 €³²⁶ Bei diesen Angaben handelt es sich jedoch um Preise für Nachrüstsysteme in relativ kleiner Stückzahl, die nicht als Abschätzung für ein Seriensystem geeignet sind.

Für Intelligent Speed Adaptation ist ebenso wie für die I2C-Abstandswarnung eine On Board Unit (OBU) erforderlich, über die die Geschwindigkeitsinformationen empfangen werden. Die Kosten hierfür werden wie bei der I2C-Abstandswarnung mit 200 € angenommen. Hinzu kommen für Intelligent Speed Adaptation die Kosten für den Eingriff ins Motormanagement. Da wie bereits erwähnt, nahezu alle Neuwagen über eine elektronische Drosselklappensteuerung verfügen, beschränkt sich der Zusatzaufwand für ISA auf die Schaffung einer Schnittstelle zwischen OBU und Motormanagement. Diese Kosten werden mit 100 € abgeschätzt, so dass die Gesamtkosten für Intelligent Speed Adaptation 300 € pro Fahrzeug entsprechen. Für die Ausstattung der in Tabelle 25 genannten Anzahl von Fahrzeugen entstünden somit bis 2018 Kosten von rd. 212 Millionen Euro, unter der Voraussetzung, dass die Kosten für die Ausrüstung der Pkw innerhalb von zehn Jahren um 30 % sinken.

Für die Ausrüstung der Tunnel sind Funkbaken erforderlich, die die Information über die erlaubte Höchstgeschwindigkeit an die Empfangs- und Steuereinheit im Fahrzeug übertragen. Die Kosten pro Bake werden mit 150 €³²⁷ angenommen und der Abstand zwischen den Baken mit 300 m³²⁸. Weitere 150 € pro Bake werden für die Einbindung des Systems in die Tunnelleittechnik veranschlagt. Die 154 Röhren der 99 betrachteten Tunnel haben eine Länge von 221 km, so dass für eine Vollausstattung 737 Baken erforderlich sind. Berücksichtigt man die abgeschätzte Entwicklung der Ausstattungsrate und einen Rückgang der Systemkosten um 10 % innerhalb von zehn Jahren, so ergibt sich bis 2018 eine Investitionssumme von rd. 52.000 €. Es zeigt sich, dass diese Infrastrukturkosten im Vergleich zur Ausrüstung der Fahrzeuge nicht ins Gewicht fallen. Details zu Kosten und Wirksamkeit finden sich im Anhang, Kapitel A2.6.

³²³ Paine, M.; Paine, D.; Griffiths, M. et al.: In-Vehicle Intelligent Speed Advisory Systems. 20th International Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, 18.-21. Juni 2007 in Lyon.

³²⁴ Ariva.de: Aktueller EUR/USD-Wechselkurs. <http://www.ariva.de/euro-dollar-kurs>, abgerufen am 5. Januar 2010. 2.000 US\$ entsprechen zum Kurs vom 5. Januar 2010 1.388 € Umgerechnet mit dem Jahresmittel 2007 (vgl. Paine, M. et al.) ergeben sich 1.428 Euro, siehe Bundesverband deutscher Banken: US-Dollar/Euro-Wechselkurs seit Anfang 2007. <http://www.bankenverband.de/pic/artikelpic/012008/2-1-2-1-IV-07-Wechselkurse.pdf>, abgerufen am 5. Januar 2010.

³²⁵ Jamson, S.; Carsten, O.; Chorlton, K. et al.: Intelligent Speed Adaptation: Literature Review and Scoping Study. Deliverable ISA-TfL D1, 2006, S. 47. Neben der University of Leeds waren die Behörde *Transport for London* sowie das Forschungs- und Entwicklungsunternehmen Mira Ltd an dem Projekt beteiligt.

³²⁶ Varhelyi, A.; Hjalmdahl, M.: History and Status of ISA in Sweden. In: Topp, H. (Hrsg.): Intelligent Speed Adaptation - Expertenstatements. Fachgebiet Mobilität & Verkehr der Technischen Universität Kaiserslautern, 2004. S. 91-102. S. 97.

³²⁷ Jamson, S.; Carsten, O.; Chorlton, K. et al., a. a. O., S. 29.

³²⁸ Federrath, H.: Sicherheit in automobilen ad-hoc Netzen. Lehrstuhl für Management der Informationssicherheit, Universität Regensburg, 2009, S. 8.

5.3.5.5. Wirksamkeit

Die Wirksamkeit von Intelligent Speed Adaptation wird von Experten einhellig als hoch eingeschätzt. Die größte Reduktion der Zahl der Getöteten wird dabei mit einem verpflichtenden, nicht übersteuerbaren System erreicht, mit dem, unter der Annahme, dass es in 100 % aller Fahrzeuge vorhanden ist und stets zuverlässig funktioniert, 100 % aller auf nicht angepasste Geschwindigkeit zurückzuführenden Unfälle vermieden werden könnten. Ihr Anteil am Gesamtunfallgeschehen beträgt für Unfälle mit Todesfolge je nach Land und Studie 29 bis 42 % und entsprechend wird die Wirksamkeit des Systems eingeschätzt.³²⁹ Dieser Wert wird mit 59 % noch übertroffen, für den Fall, dass das System dynamische, d. h. situationsangepasste Geschwindigkeitsvorgaben machen kann, siehe Tabelle 27.

Diesem Maximalwert stehen 18 bis 24 % gegenüber, die für ein reines Warnsystem angegeben werden. Für die hier betrachtete Variante eines eingreifenden Systems, das vom Fahrer übersteuert werden kann, beträgt die Wirksamkeit 19-32 %, abhängig davon, ob fixe oder dynamische Geschwindigkeitsvorgaben gemacht werden können.

Tabelle 27: Schätzung der Wirksamkeit von Intelligent Speed Adaptation-Systemen³³⁰

ISA-Typ	Art der Geschwindigkeitsvorgabe	Vermeidung Verletzte	Vermeidung Getötete
Warnend	fest	10 %	18 %
	variabel	10 %	19 %
	dynamisch	13 %	24 %
Eingreifend, übersteuerbar	fest	10 %	19 %
	variabel	11 %	20 %
	dynamisch	18 %	32 %
Eingreifend, nicht übersteuerbar	fest	20 %	37 %
	variabel	22 %	39 %
	dynamisch	36 %	59 %

Für den Einsatz im Tunnel wird angenommen, dass aufgrund der vorhandenen Verkehrsüberwachungsanlagen und der Tunnelzentrale dynamische Informationen zur Verfügung stehen, was einer Wirksamkeit von 32 % entspräche und damit 76 % des maximal möglichen Wertes von 42 %. Dies entspricht der Aussage, dass 76 % aller durch nicht angepasste Geschwindigkeit Getöteten durch den Einsatz des Systems vermieden werden könnten, was allerdings nur dann Gültigkeit hat, wenn alle Fahrzeuge und alle Tunnel mit dem System ausgerüstet sind. Für eine nur teilweise Verfügbarkeit ist entsprechend Tabelle 26 das Produkt der beiden Ausstattungsraten für die Abschätzung der Wirksamkeit zugrunde gelegt. Aufgrund der geringen Werte der verbundenen Ausstattungsrate ergibt sich ein Vermeidungspotential von Null bis 2013 und ebenso bis 2018.

³²⁹ Paine, M.; Paine, D.; Griffiths, M. et al.: In-Vehicle Intelligent Speed Advisory Systems. 20th International Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, 18.-21. Juni 2007 in Lyon, S. 2.

³³⁰ Carsten, O. M. J.; Tate, F. N.: Intelligent Speed Adaptation: Accident Savings and Cost-Benefit Analysis. In: Accident Analysis and Prevention Bd. 37, Nr. 3, 2005. S. 407-416. Nach: Jamson, S.; Carsten, O.; Chorlton, K. et al.: Intelligent Speed Adaptation: Literature Review and Scoping Study. Deliverable ISA-TfL D1, 2006, S. 33.

5.3.5.6. Zusammenfassung

Tabelle 28: Zusammenfassung Intelligent Speed Adaptation

Intelligent Speed Adaptation ³³¹	
Marktdurchdringung: <u>Legende</u> sehr niedrig: 0-5 % niedrig: 6-20 % mittel: 21-50 % hoch: 51-80 % sehr hoch: 81-100 %	
Kosten Tunnel:	1.000 €/km Rückgang um 10 % innerhalb von zehn Jahren → rd. 52.100 Euro von 2009 bis 2018
Kosten Pkw:	300 €/Pkw Rückgang um 30 % innerhalb von zehn Jahren → rd. 212 Millionen Euro von 2009 bis 2018
Wirksamkeit:	76 % der Alleinunfälle → Vermeidung Getötete: 2009-2013: 0 (0) 2014-2018: 0 (0,2) gesamt: 0 (0,2)

5.3.6. Vergleich von Kosten und Wirksamkeit der ausgewählten Systeme

Auf Basis der Daten, die im vorangegangenen Kapitel erläutert wurden und die ausführlich in Anhang A2 zu finden sind, werden in diesem Kapitel die Barwerte für jedes Szenario berechnet und die Sensitivitätsanalyse durchgeführt.

5.3.6.1. Barwerte

Die Berechnung der Barwerte für die vier Szenarien erfolgt mit der in Kapitel 5.2.3 genannten Formel (9) und einem Diskontierungssatz von 5 %. Die Ergebnisse sind in den folgenden vier Tabellen dargestellt.

³³¹ Details siehe Anhang A2.6.

Tabelle 29: Barwert Moving Spot Light System

Jahr	Periode	Nutzen	Investitionskosten Tunnel pro Jahr	Barwert bezogen auf 2009
2009	1	0,00	0 €	0 €
2010	2	0,04	1.136.431 €	1.030.777 €
2011	3	0,08	1.123.662 €	970.662 €
2012	4	0,12	1.110.893 €	913.935 €
2013	5	0,19	2.196.249 €	1.720.818 €
2014	6	0,31	3.256.067 €	2.429.727 €
2015	7	0,42	3.217.760 €	2.286.802 €
2016	8	0,54	3.179.453 €	2.151.979 €
2017	9	0,65	3.141.147 €	2.024.811 €
2018	10	0,77	3.102.840 €	1.904.875 €
Summen:		3,12	21.464.502 €	15.434.385 €

Tabelle 30: Barwert I2C-Abstandswarnung

Jahr	Periode	Nutzen	Investitionskosten Tunnel pro Jahr	Investitionskosten Pkw pro Jahr	Summe der Investitionskosten pro Jahr	Barwert bezogen auf 2009
2009	1	0,00	0 €	0 €	0 €	0 €
2010	2	0,00	60.100 €	0 €	60.100 €	54.512 €
2011	3	0,00	59.424 €	0 €	59.424 €	51.333 €
2012	4	0,00	58.749 €	0 €	58.749 €	48.333 €
2013	5	0,00	58.074 €	0 €	58.074 €	45.502 €
2014	6	0,00	68.878 €	4.351.393 €	4.420.271 €	3.298.474 €
2015	7	0,01	68.068 €	8.990.878 €	9.058.946 €	6.438.023 €
2016	8	0,01	67.258 €	13.914.989 €	13.982.246 €	9.463.735 €
2017	9	0,03	66.447 €	19.116.789 €	19.183.236 €	12.365.685 €
2018	10	0,04	65.637 €	24.585.294 €	24.650.931 €	15.133.533 €
Summen:		0,09	572.636 €	70.959.342 €	71.531.977 €	46.899.131 €

Tabelle 31: Barwert Section Control

Jahr	Periode	Nutzen	Investitionskosten Tunnel pro Jahr	Barwert bezogen auf 2009
2009	1	0,05	0 €	0 €
2010	2	0,10	1.827.467 €	1.657.566 €
2011	3	0,16	1.806.933 €	1.560.897 €
2012	4	0,21	1.786.400 €	1.469.676 €
2013	5	0,26	1.765.867 €	1.383.603 €
2014	6	0,34	2.618.000 €	1.953.592 €
2015	7	0,42	2.587.200 €	1.838.675 €
2016	8	0,49	2.556.400 €	1.730.272 €
2017	9	0,57	2.525.600 €	1.628.024 €
2018	10	0,65	2.494.800 €	1.531.591 €
Summen:		3,25	19.968.667 €	14.753.895 €

Tabelle 32: Barwert Intelligent Speed Adaptation

Jahr	Periode	Nutzen	Investitionskosten Tunnel pro Jahr	Investitionskosten Pkw pro Jahr	Summe der Investitionskosten pro Jahr	Barwert bezogen auf 2009
2009	1	0,00	0 €	0 €	0 €	0 €
2010	2	0,00	5.464 €	995.897 €	1.001.361 €	908.264 €
2011	3	0,00	5.402 €	5.144.323 €	5.149.725 €	4.448.526 €
2012	4	0,00	5.341 €	10.615.678 €	10.621.019 €	8.737.939 €
2013	5	0,01	5.279 €	16.407.120 €	16.412.400 €	12.859.545 €
2014	6	0,01	6.262 €	22.507.203 €	22.513.465 €	16.799.894 €
2015	7	0,02	6.188 €	28.899.249 €	28.905.437 €	20.542.555 €
2016	8	0,04	6.114 €	35.560.526 €	35.566.641 €	24.072.902 €
2017	9	0,06	6.041 €	42.461.330 €	42.467.370 €	27.374.846 €
2018	10	0,08	5.967 €	49.563.952 €	49.569.919 €	30.431.630 €
Summen:		0,22	52.058 €	212.155.279 €	212.207.337 €	146.176.100 €

Das Verhältnis von Barwert zu kumulierten jährlichen Kosten ist bei der I2C-Abstandswarnung am geringsten, siehe Tabelle 33, da die Kosten im Vergleich zu den anderen Systemen weiter in der Zukunft liegen. Es zeigt sich außerdem, dass die Kosten der kooperativen Systeme von den Fahrzeugkomponenten dominiert werden, während die Ausrüstung der Infrastruktur deutlich weniger ins Gewicht fällt.

Tabelle 33: Verhältnis von Barwert zu kumulierten jährlichen Kosten

System	Verhältnis von Barwert zu kumulierten jährlichen Kosten
Moving Spot Light System	71,9 %
I2C-Abstandswarnung	65,6 %
Section Control	73,9 %
Intelligent Speed Adaptation	68,9 %

5.3.6.2. Kosten-Wirksamkeitsverhältnis

Das Kosten-Wirksamkeitsverhältnis drückt aus, welche Kosten pro Wirkungseinheit mit einer Maßnahme verbunden sind. Für die untersuchten Szenarien ist das jeweilige Verhältnis in Tabelle 34 angegeben.

Tabelle 34: Zusammenfassung Kosten-Wirksamkeitsverhältnis

	Moving Spot Light System	I2C-Abstandswarnung	Section Control	Intelligent Speed Adaptation
Kosten (Barwert)	15.434.385 €	46.899.131 €	14.753.895 €	146.176.100 €
Wirksamkeit	3,12	0,09	3,25	0,22
Kosten-Wirksamkeitsverhältnis	4,9 Millionen Euro pro Menschenleben	521,1 Millionen Euro pro Menschenleben	4,5 Millionen Euro pro Menschenleben	664,4 Millionen Euro pro Menschenleben

Eine anschauliche Darstellung der Ergebnisse einer Kosten-Wirksamkeitsanalyse zeigt die folgende Abbildung 17.³³²

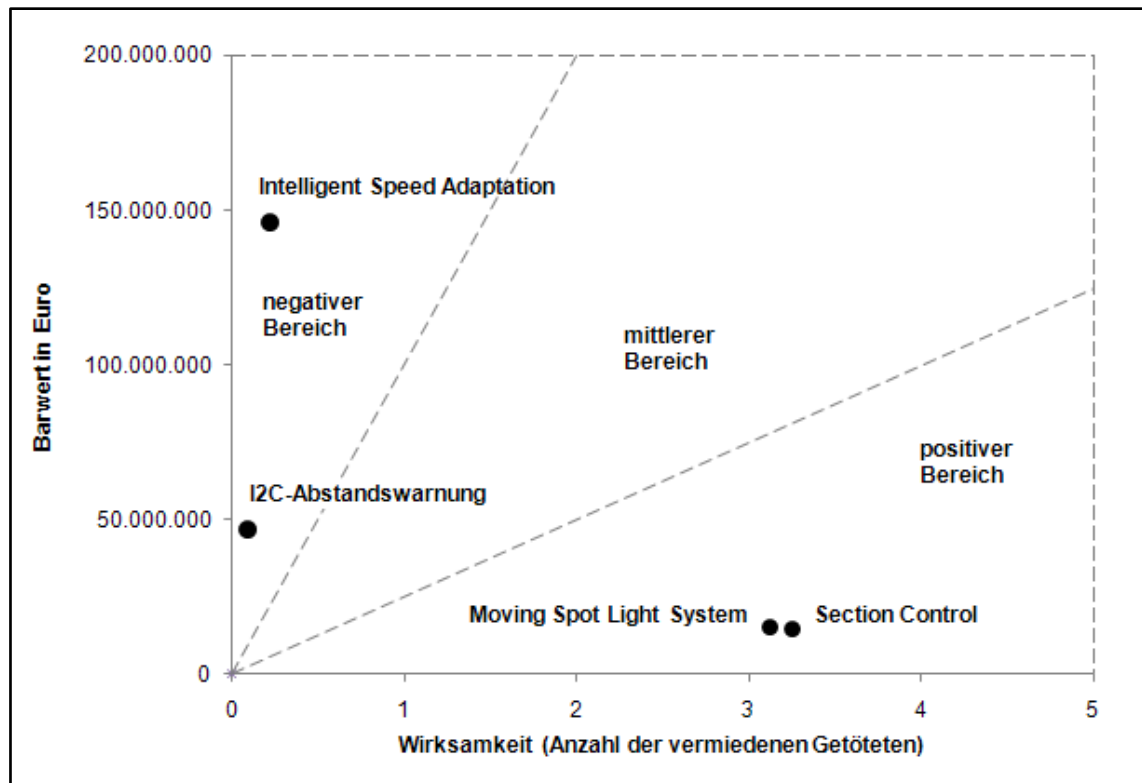


Abbildung 17: Veranschaulichung des Kosten-Wirksamkeitsverhältnisses

Die Grenzen für die Einteilung in negativen, mittleren und positiven Bereich müssen dabei vom Bearbeiter festgelegt werden. Zur Illustration wurde angenommen, dass die Vermeidung eines Getöteten 25 bzw. 100 Millionen Euro wert sei. Die Festlegung solcher Beträge ist mehr oder weniger willkürlich, siehe Tabelle 17 in Kapitel 5.1.

Unabhängig von diesen Grenzen zeigt sich jedoch, dass die beiden reinen Tunnel-Systeme aufgrund der wesentlich geringeren Kosten und der früher einsetzenden Wirksamkeit ein günstigeres Kosten-Wirksamkeitsverhältnis aufweisen als die beiden kooperativen Systeme. Bei letzteren ist die I2C-Abstandswarnung gegenüber Intelligent Speed Adaptation deshalb im Vorteil, weil deren Kosten geringer sind und zu einem späteren Zeitpunkt anfallen. Im Hinblick auf die Wirksamkeit fallen die beiden kooperativen Systeme jedoch deutlich gegen die beiden Tunnel-Systeme ab.

³³² Schulte-Zurhausen, M.: Organisation. Vahlen, München, 2005, S. 575.

5.3.7. Sensitivitätsanalyse

Die Ergebnisse der Kosten-Wirksamkeitsanalyse beruhen auf Berechnungen, für die plausible Annahmen und Abschätzungen getroffen werden mussten. Wie vertrauenswürdig bzw. stabil diese Ergebnisse sind, wird im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse überprüft, indem eine Variation der Parameter durchgeführt und alternative Gesamtergebnisse ermittelt werden. Ändert sich die Rangfolge der bewerteten Alternativen bereits bei einer geringen Veränderung der Parameter, so ist das Ergebnis der Kosten-Wirksamkeitsanalyse kritisch zu betrachten.³³³

Eine Sensitivitätsanalyse kann entweder durch die Variation einzelner Parameter durchgeführt werden (univariate Analyse) oder indem durch die gleichzeitige Veränderung mehrerer Größen alternative Szenarien beschrieben werden (multivariate Analyse). Das bisher ermittelte Ergebnis der Kosten-Wirksamkeitsanalyse stellt dabei das Basis- oder *best guess*-Szenario dar. Üblich ist nun, die Grundannahmen dieses *best guess*-Szenarios dahingehend zu variieren, dass ein optimistisches *best case*- und ein pessimistisches *worst case*-Szenario beschrieben werden.³³⁴

Für die *best case*- und *worst case*-Szenarien werden die Parameter Wirksamkeit, Kosten und Entwicklung der Marktdurchdringung variiert. Für das *best case*-Szenario wird angenommen, dass die Wirksamkeit der Systeme um 10 % höher ist als im *best guess*-Szenario, die Kosten schneller sinken und sich die Systeme schneller am Markt durchsetzen können. Letzteres bedeutet für die Tunnel, dass bis zum Jahr 2018 25 % mehr Tunnel ausgestattet werden können. Für die Fahrzeuge wird angenommen, dass sehr früh 100 % aller Neuwagen mit dem jeweiligen System ausgerüstet sind. Die Kosten für Infrastrukturkomponenten reduzieren sich innerhalb von zehn Jahren um 20 % statt um 10 %, für die Fahrzeugkomponenten wird ein Rückgang von 60 % statt 30 % im Zeitraum angenommen.

Im *worst case*-Szenario ist nur ein geringer Kostenrückgang zu verzeichnen. Er beträgt innerhalb von zehn Jahren 5 % für die Infrastruktur- und 15 % für die Fahrzeugkomponenten. Die Marktdurchdringungsrate entwickelt sich langsamer, da die Ausstattung der Neuwagen und der Tunnel um 10 % geringer ist. Ebenso wird die Wirksamkeit der Systeme um 10 % geringer angenommen. In Tabelle 35 sind die Annahmen für best und worst case im Vergleich zum best guess-Szenario zusammengefasst.

³³³ Siehe z. B. Breiting, A.; Knosala, R.: Bewerten technischer Systeme. Springer, Berlin, 1997, S. 213.

³³⁴ U.a. in Baum, H.; Geißler, T.; Westerkamp, U. et al.: eIMPACT: Cost-benefit Analyses for Stand-alone and Co-operative Intelligent Vehicle Safety Systems. Deliverable D6, 2008, S. 54ff; Auerbach, H.; Issing, M.; Karrer, K. et al.: Fahrzeuggestützte Notrufsysteme (eCall) für die Verkehrssicherheit in Deutschland. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Heft F 69. Wirtschaftsverlag NW, Bergisch-Glattbach, 2008, S. 93ff; Greiner, W.; Schöffski, O.: Grundprinzipien einer Wirtschaftlichkeitsuntersuchung. In: Schöffski, O.; Graf von der Schulenburg, J. (Hrsg.): Gesundheitsökonomische Evaluationen. Berlin: Springer, 2008. S. 186-188.

Tabelle 35: Parameter für *best case* und *worst case* im Vergleich zu *best guess*

	<i>best guess</i>	<i>best case</i>	<i>worst case</i>
Kostenentwicklung über zehn Jahre	Infrastruktur: -10 % Fahrzeuge: -30 %	Infrastruktur: -20 % Fahrzeuge: -60 %	Infrastruktur: -5 % Fahrzeuge: -15 %
Wirksamkeit	siehe Kapitel 5.3.2 bis 5.3.5	+10 %	-10 %
Ausrüstung der Tunnel		+25 %	-10 %
Ausrüstung der Pkw		100 % aller Neuwagen ab 2012 (ISA) bzw. 2015 (I2C)	-10 %

Die Kosten-Wirksamkeitsverhältnisse für *best case* und *worst case* sind in Tabelle 36 und Tabelle 37 zusammengefasst. Ausführlich sind die Daten für den *best case* in Anhang A3 und für den *worst case* in Anhang A4 zu finden.

Tabelle 36: Kosten-Wirksamkeitsverhältnis im *best case*

	Moving Spot Light System	I2C-Abstands- warnung	Section Control	Intelligent Speed Adaptation
Kosten (Barwert)	17.990.293 €	40.446.177 €	17.329.472 €	104.073.835 €
Wirksamkeit	4,26	4,06	4,50	4,73
Kosten- Wirksamkeits- verhältnis	4,2 Millionen Euro pro Menschenleben	10 Millionen Euro pro Menschenleben	3,9 Millionen Euro pro Menschenleben	22 Millionen Euro pro Menschenleben

Tabelle 37: Kosten-Wirksamkeitsverhältnis im *worst case*

	Moving Spot Light System	I2C-Abstands- warnung	Section Control	Intelligent Speed Adaptation
Kosten (Barwert)	14.359.915 €	50.132.018 €	13.679.149 €	167.227.815 €
Wirksamkeit	2,53	0,06	2,65	0,16
Kosten- Wirksamkeits- verhältnis	5,7 Millionen Euro pro Menschenleben	835,5 Millionen Euro pro Menschenleben	5,2 Millionen Euro pro Menschenleben	1.045,2 Millionen Euro pro Menschenleben

Die Rangfolge der vier Systeme ist sowohl im *best guess*-, als auch im *best case*- und *worst case*-Szenario dieselbe, das Ergebnis der Kosten-Wirksamkeitsanalyse ist damit als stabil zu betrachten. Eine graphische Darstellung der Kosten-Wirksamkeitsverhältnisse für alle drei Szenarien zeigt Abbildung 18.

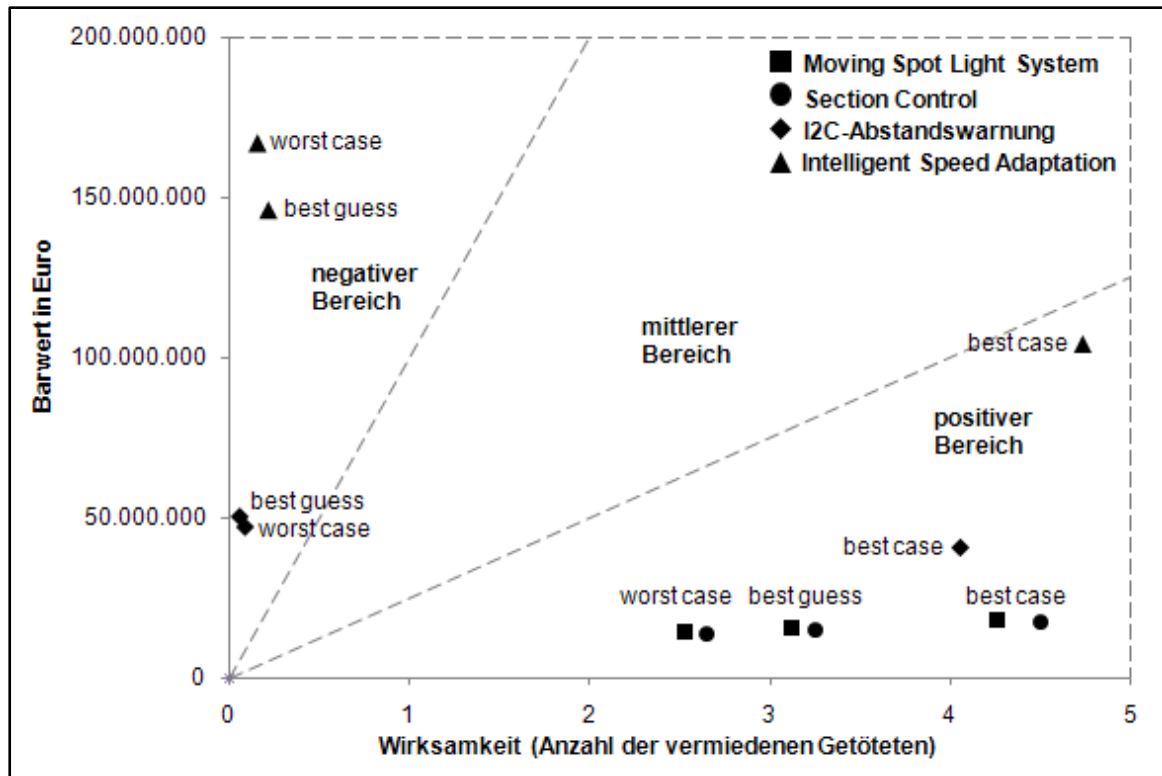


Abbildung 18: Kosten-Wirksamkeitsverhältnisse für *best guess*, *best case* und *worst case*

5.3.8. Zusammenfassung der Kosten-Wirksamkeitsanalyse

Ausgangspunkt der Kosten-Wirksamkeitsanalyse war die Hypothese, dass kooperative Systeme im Bereich der Tunnelsicherheit Synergien ermöglichen und rein infrastruktur-basierten Systemen überlegen seien. Die Ergebnisse der Kosten-Wirksamkeitsanalyse bestätigen diese Hypothese jedoch nicht. Sowohl im *best guess*- als auch im *best case*- und *worst case*-Szenario ist das Verhältnis von Kosten zu erzielbarem Nutzen für die reinen Infrastruktursysteme günstiger als für die kooperativen.

Im *best case*-Szenario befinden sich zwar alle vier Systeme im positiven Bereich, siehe Abbildung 18, doch auch in diesem Fall haben die beiden kooperativen Systeme ein schlechteres Kosten-Wirksamkeitsverhältnis als die rein infrastruktur-basierten. Die Ursache hierfür ist nicht im Bereich der prinzipiellen Wirksamkeit zu suchen, denn auf Basis der ausgewerteten Forschungsvorhaben liegen die Schätzungen für das jeweilige Unfallvermeidungspotential in ähnlicher Größenordnung. Problematisch ist vielmehr, dass bei kooperativen Systemen neben den Tunneln auch die Fahrzeuge mit entsprechenden Komponenten ausgestattet werden müssen. Dies hat zur Folge, dass die Systemkosten aufgrund der im Vergleich zu den Tunneln sehr großen Zahl an Fahrzeugen stark ansteigen. Um mit den reinen Infrastruktursysteme konkurrieren zu können, müsste die Ausrüstung der Fahrzeuge wesentlich günstiger sein als angenommen. Legt man das *best case*-Szenario sowie ein angestrebtes Kosten-Wirksamkeitsverhältnis von ca. 4 Millionen Euro pro Menschenleben zugrunde, so ergibt sich für die I2C-Abstandswarnung ein maximaler Preis von 78 € und für Intelligent Speed Adaptation von 55 €. Für das realistischere *best guess*-Szenario sind Kosten-Wirksamkeitsverhältnisse von 4,8 bzw. 4,6 Millionen Euro

pro Menschenleben nur zu erreichen, wenn die Ausrüstung der Fahrzeuge null bzw. 2 € kostet. Details zu diesen Berechnungen sind im Anhang, Kapitel A5 zu finden. Sie beziehen sich ausschließlich auf die Wirkung der Systeme zur Unfallvermeidung in Straßentunneln und lassen Nutzen, die in anderen Umgebungen entstehen können außen vor. Bei einer Gesamtbetrachtung könnte sich daher ein günstigeres Kosten-Nutzen-Verhältnis und folglich ein höheres Preisniveau einstellen. Allein auf Basis des Nutzenanteils aus dem Anwendungsfall Tunnel wird ein realistisches Preisniveau nicht zu erreichen sein.

Das zweite Problem, das die Ausrüstung der Fahrzeuge mit sich bringt, ist die verzögerte Nutzenrealisierung. Verantwortlich dafür ist der relativ lange Lebenszyklus der Fahrzeuge, durch den eine Reihe von Jahren vergeht, bis eine nennenswerte Marktdurchdringung erreicht wird. Solange diese Marktdurchdringung gering ist, können die Systeme ihren Nutzen zu wenig entfalten, da dies nur dann möglich ist, wenn beide Beteiligte – Tunnel und Fahrzeug – über die erforderliche Ausrüstung verfügen. Auch dies wirkt sich negativ auf das Kosten-Wirksamkeitsverhältnis aus.

Unter Berücksichtigung der Analyseergebnisse und der dargestellten Gründe kann aus gesellschaftlicher Perspektive keine Empfehlung ausgesprochen werden, zur Erhöhung der Verkehrssicherheit von Straßentunneln auf kooperative Systeme zu setzen. Investitionen in rein infrastrukturbasierte Systeme sind die sinnvollere Alternative.

6. Stakeholder-Analyse

„Nichts ist an sich nützlich; nützlich und weniger nützlich ist etwas immer nur in Hinblick auf bestimmte Interessen, Werte, Zielstellungen und Endzustände, über die und deren Berechtigung und Vernünftigkeit man sich also immer klar sein muss, wenn man eine solide nutzenmaximierende Kalkulation unternimmt.“³³⁵

Die Kosten-Wirksamkeitsanalyse, deren Ergebnisse im vorangegangenen Kapitel erläutert wurden, bewertet Systeme nach gesamtgesellschaftlichen Gesichtspunkten, d. h. sowohl Kosten als auch Nutzen werden aus Sicht der Gemeinschaft ermittelt und ins Verhältnis gesetzt. Von dieser gesamtgesellschaftlichen Sicht kann sich die Bewertung durch ein Individuum oder eine gesellschaftliche Teilgruppe jedoch grundlegend unterscheiden. Ausschlaggebend ist dabei zum einen, wie das Individuum bzw. die Gruppe aufgrund ihrer Interessen und Wertvorstellungen den Nutzen der Systeme oder Maßnahmen einschätzt; zum anderen, wie Kosten und Nutzen verteilt sind. Beide Aspekte spielen in einer gesamtgesellschaftlichen Bewertung keine Rolle. Liegt allerdings eine Situation vor, in der eine bestimmte Gruppe von Nutzern zwar die Kosten einer Maßnahme tragen muss, der Nutzen aber vorwiegend oder ausschließlich einer anderen Gruppe zugutekommt, so ist davon auszugehen, dass die Maßnahme in der Gruppe, die die Kosten zu tragen hätte, keine Akzeptanz findet. Der Widerspruch zwischen gesamtwirtschaftlicher und individueller Rentabilität würde in einem solchen Fall dazu führen, dass die Maßnahme mit hoher Wahrscheinlichkeit scheitert, da die potentiellen Käufer nicht bereit wären, für das Produkt bzw. die Leistung zu zahlen.³³⁶ Ohne Zahlungsbereitschaft wird sich jedoch auch eine gesamtwirtschaftlich höchst nützliche und zweckmäßige Maßnahme nicht durchsetzen können.

Die Bewertung der Maßnahmen aus gesamtwirtschaftlicher Sicht im Rahmen der Kosten-Wirksamkeitsanalyse kann daher nur ein Teil einer umfassenden Bewertung sein. Den zweiten Teil bildet eine sog. Stakeholder-Analyse, in der die individuelle Einschätzung der Maßnahmen durch die Stakeholder ermittelt wird. Unter dem Begriff Stakeholder werden alle Individuen, gesellschaftlichen Gruppen oder Institutionen verstanden, die von einer bestimmten Maßnahme direkt oder indirekt, positiv oder negativ betroffen sind oder ein sonstiges Interesse an ihr haben. Solche Analysen sind nicht formalisiert und beruhen auf Expertenurteilen, Umfragen oder öffentlichen Diskussionen. Sie sind erforderlich, um Klarheit über Ziele und Motive der Betroffenen zu erhalten und einen möglichst breiten Rückhalt bzw. möglichst hohe Akzeptanz zu erreichen.³³⁷ Dies gilt sowohl für Planungsprozesse, z. B. im Bereich der Verkehrsplanung, als auch für die Einführung neuer Produkte, da die Markteinführungsstrategie auf die jeweiligen Stakeholder abzustimmen ist.

³³⁵ Kersting, W.: Gerechtigkeitsethische Überlegungen zur Gesundheitsvorsorge. In: Schöffski, O.; Graf von der Schulenburg, J. (Hrsg.): Gesundheitsökonomische Evaluationen. Berlin: Springer, 2008. S. 23-47, S. 40.

³³⁶ Abele, J.; Kerlen, C.; Krüger, S. et al.: SEISS: Exploratory Study on the Potential Socio-economic Impact of the Introduction of Intelligent Safety Systems in Road Vehicles. Teltow, 2005, S. 18.

³³⁷ Höfler, F.: Verkehrswesen-Praxis. Band 1: Verkehrsplanung. Bauwerk, Berlin, 2004, S. 66.

6.1. Identifikation der Stakeholder

Für die hier behandelte Fragestellung ist eine Reihe von Stakeholdern von Relevanz. Keine einzelne Gruppierung ist in der Lage, neue Technologien wie beispielsweise kooperative Fahrzeug-Infrastruktur-Systeme zu realisieren. In diesen Prozess sind vielmehr Fahrzeughersteller, Komponentenhersteller (z. B. von Sensoren), Unternehmen aus dem Bereich der Kommunikationstechnologie und der Verkehrstechnik involviert. Auch öffentliche Institutionen spielen eine Rolle, sowohl auf europäischer als auch auf nationaler Ebene.³³⁸ Die Expertengruppe der UNECE zum Thema Tunnelsicherheit legt ihrer Untersuchung beispielsweise die vier Gruppen Tunnelbetrieb, Infrastruktur, Straßennutzer und Fahrzeuge zugrunde,³³⁹ aus denen die Stakeholder ersichtlich sind: Es sind zum einen die Fahrer, die in ihren Fahrzeugen den Tunnel durchqueren, die Hersteller dieser Fahrzeuge und zum anderen die Betreiber bzw. Eigner der Tunnelanlagen.

Die Interessen und Handlungsmotive dieser Gruppen unterscheiden sich deutlich von einander. Im Projekt IN-SAFETY, *Infrastructure and Safety*, wurden beispielsweise Nutzer, Politiker und Fahrzeughersteller zu sechs unterschiedlichen infrastrukturbasierten Verkehrssicherheitssystemen befragt. Die Rangfolge der Systeme wurde in den Gruppen mittels Paarvergleich ermittelt und zeigt das folgende Ergebnis:

Tabelle 38: Ergebnis der Systembewertung im Projekt IN-SAFETY³⁴⁰

System	Rangfolge Nutzer	Rangfolge Fzg.-Hersteller	Rangfolge Politik
1. Übertragung der Informationen variabler Beschilderung (variable message sign, VMS) ins Fahrzeug, dynamische Geschwindigkeitsbeschränkung auf Autobahnen	2	1	3
2. Übertragung der Warnung "Schulbus voraus!" ins Fahrzeug	4	2	6
3. Übertragung einer Geschwindigkeitswarnung in Kurven ins Fahrzeug	3	5	2
4. Übertragung einer Fahrstreifenverlassenswarnung ins Fahrzeug auf Autobahnen	6	3	5
5. Übertragung einer Warnung vor Fahrzeugen im toten Winkel beim Überholen, (mehr als ein Fahrstreifen pro Richtung, getrennte Fahrbahnen)	5	4	4
6. Übertragung einer Warnung vor entgegenkommenden Fahrzeugen beim Überholen, (1 Fahrstreifen pro Richtung)	1	6	1

³³⁸ van Arem, B.: Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems: an Intelligent Way Forward? TNO report 2007-D-R0158/B, Delft, 2007, S. 12.

³³⁹ United Nations Economic Commission for Europe, Inland Transport Committee: Recommendations of the Group of Experts on Safety in Road Tunnels - UNECE-Report TRANS/AC.7/9. 2001.

³⁴⁰ Macharis, C.; Verbeke, A.; De Brucker, K. et al. (Hrsg.): IN-SAFETY: Implementation Scenarios and Further Research Priorities Regarding Forgiving and Self-explaining Roads. Deliverable D5.3, 2008, S. 59. Eine ähnliche Untersuchung im Projekt eIMPACT zeigt ebenfalls die Abhängigkeit des Rankings von den Stakeholdern. Vollmer, D.; Baum, H.; Fausten, M. G. T. et al.: eIMPACT: Inventory and Recommendations for In-depth Socio-economic Impact Assessment. Deliverable D2, 2006, S. 28ff.

Einzig die Bewertung von System Nr. 5 ist für alle drei Stakeholder ähnlich, die fünf anderen Systeme werden z. T. sehr unterschiedlich eingeschätzt. Das Dilemma der unterschiedlichen Interessen lässt sich anhand von System 2 nachvollziehen. Die Warnung, dass sich ein Schulbus im näheren Verlauf des Verkehrsstroms befindet, ließe sich aus Sicht der Fahrzeughersteller relativ einfach und kostengünstig umsetzen, wenn vorausgesetzt wird, dass der Bus über einen Sender verfügt, der seine Position an eine Infrastruktureinrichtung weitergibt, von wo aus sie ins Fahrzeug übertragen wird. Die Endnutzer vergeben an das System eine mittlere Bewertung, da sie zwar den Schutz der Schulkinder als wichtig ansehen, von anderen Systemen aber einen höheren Nutzen für sich persönlich erwarten. Aus Sicht der Politik bzw. der öffentlichen Hand wird das System auf den letzten Platz verwiesen, da es zusätzlich zu den bei allen Systemen anfallenden Infrastrukturkosten auch Kosten für die Ausstattung der Busse mit entsprechenden Sendern erfordert und somit die öffentliche Hand, die in der Regel für die Schülertransporte zuständig ist, stärker belastet als die anderen Systeme.

6.2. Ziele und Interessen der Stakeholder

6.2.1. Tunnelbetreiber

Tunnelbetreiber können öffentliche Institutionen oder privatwirtschaftliche Unternehmen sein, was im Hinblick auf eine Einschätzung ihrer Ziele und Interessen zu unterscheiden ist.

Öffentliche Betreiber, d. h. Institutionen wie Kreise, Bundesländer oder Staaten stimmen in ihren Werten und Motiven am ehesten mit dem überein, was im Rahmen der Kosten-Wirksamkeitsanalyse als gesamtwirtschaftliche Perspektive ermittelt wurde. Es wird von politischen Entscheidungsträgern erwartet, dass sie das Ziel verfolgen, die Wohlfahrt der Gesellschaft zu steigern, wozu auch der Schutz der Bevölkerung vor Gefahren zählt. Politische Institutionen können daher einen großen Einfluss auf den Erfolg und die Verbreitung von neuen Technologien oder Systeme haben, indem sie sie durch Forschungsmittel oder legislative Maßnahmen fördern.³⁴¹

Problematisch ist allerdings, dass politische Entscheidungen häufig keine rationalen Entscheidungen auf Basis einer analytischen Kosten-Nutzen-Abwägung sind, sondern ihrer eigenen Logik folgen. Bei einer analytischen Vorgehensweise, wie sie in der Wissenschaft und bei Ingenieuren allgemein üblich ist, stehen Machbarkeit und Effizienz im Vordergrund. Für einen politischen Entscheidungsträger ist die Effizienz einer Lösung häufig nur ein Kriterium unter vielen und er hat Aspekte wie die Durchsetzbarkeit oder auch die öffentliche Meinung zu berücksichtigen, weshalb davon auszugehen ist, dass sich die Ergebnisse der Entscheidungsprozesse häufig unterscheiden.

In Tabelle 39 sind ein Modell analytischer Entscheidungsfindung für die Verkehrssicherheitspolitik und ein Modell des tatsächlichen, politischen Entscheidungsverlaufs einander

³⁴¹ Mankinen, E.; Anttila, V.; Penttinen, M. et al.: ADVISORS: Actors Interests, Acceptance, Responsibilities and Users' Awareness Enhancement. Deliverable D2 V1, 2001, S. 9.

gegenübergestellt. Die unterschiedliche Vorgehensweise zeigt, dass politische Entscheidungsträger darum bemüht sind, einen Konsens für eine Entscheidung zu finden und die vorhandenen Institutionen in den Prozess einzubinden. Das analytische Modell setzt im Gegensatz dazu voraus, dass die Lösung mit der größten Effizienz, d. h. dem besten Kosten-Nutzen-Verhältnis, umzusetzen ist, unabhängig von politischen Realitäten.³⁴²

Tabelle 39: Politische Entscheidungen – analytisches Modell vs. tatsächliches Vorgehen³⁴³

	Analytisches Modell von Entscheidungsprozessen im Bereich der Verkehrssicherheitspolitik	Modell tatsächlicher Entscheidungsprozesse im Bereich der Verkehrssicherheitspolitik
1	Beschreibe aktuelle Probleme der Straßenverkehrssicherheit und bewerte ihre relative Wichtigkeit in Bezug auf die Getöteten und Verletzten, die durch sie verursacht werden	Identifiziere Themen, die Entscheidungen erfordern (entwickle eine politische Agenda)
2	Entwickle Ziele für die Straßenverkehrssicherheit und entscheide über deren Quantifizierung und andere Politikziele	Stelle Einfluss auf die politische Agenda her (definiere wie, wann und durch wen Entscheidungen zu aktuellen Themen getroffen werden)
3	Untersuche potentiell wirksame Verkehrsicherheitsmaßnahmen und entscheide, welche Maßnahmen dafür sorgen können, die Sicherheit zu verbessern	Identifiziere relevante Stakeholder und Institutionen für jeden Punkt der Agenda (prüfe die Machtstruktur)
4	Beschreibe das aktuelle Straßenverkehrssystem und entwickle eine Systembeschreibung zur Analyse alternativer Handlungsoptionen	Entwickle vorläufige Kriterien für politisch machbare Lösungen (definiere Eigenschaften wünschenswerter Lösungen)
5	Entwickle alternative Handlungsoptionen für die Straßenverkehrssicherheit, die die Haupthandlungsrichtung der Politik aufzeigen	Beteilige dich an Beratungen oder Verhandlungen mit relevanten Stakeholdern (stelle Konsens oder weitreichende Unterstützung sicher)
6	Schätze die Wirkung auf die Anzahl der Getöteten oder verletzten Straßennutzer für jede Handlungsoption ab und alle Wirkungen auf weitere Politikziele	Sammele Informationen bezüglich der Auswirkungen der politisch machbaren Lösungen (informelle Bewertung der Auswirkungen)
7	Bewerte Unsicherheiten in den abgeschätzten Wirkungen und diskutiere den Umgang mit Unsicherheit in der Verkehrssicherheitspolitik	Schließe Bündnisse oder Koalitionen, um eine Mehrheit für die politisch machbaren Lösungen zu sichern (Kuhhandel)
8	Bewerte abschließend alle Aspekte, die für die Handlungsoptionen relevant sind, und wähle die bevorzugte Option aus	Formelle Entscheidungsfindung (durch Wahl oder Konsens)
9	Setze die bevorzugte Handlungsoption um und bewerte ihre Wirkung	Umsetzung und Überwachung der beschlossenen Politik (anhand mehrerer Kriterien)

Die Motivlage eines politischen Entscheidungsträgers, der über Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit von Straßentunneln zu entscheiden hat, ist schwierig zu verallgemeinern. Die Ziele und Interessen hängen stark vom jeweiligen Umfeld ab, z. B. ob es in der jüngeren Vergangenheit schwerwiegende Unfälle gab, ob eine Wiederwahl ansteht, ob Unternehmen, die die in Frage kommende Sicherheitssysteme anbieten, in der Region

³⁴² Elvik, R.; Veisten, K.: ROSEBUD: Road Safety and Environmental Benefit-Cost and Cost-Effectiveness Analysis for Use in Decision-Making. Report "Barriers to the Use of Efficiency Assessment Tools in Road Safety Policy". Deliverable D4, 2004, S. 12.

³⁴³ Elvik, R.; Veisten, K., a. a. O., S. 10-12. Eigene Übersetzung.

angesiedelt sind, ob sich Bürgerinitiativen mit dem Thema befassen usw. Es wird daher in Ermangelung eines geeigneten Modells als Vereinfachung angenommen, dass politische Entscheidungsträger das Ziel der Wohlfahrtssteigerung verfolgen und damit das gesellschaftliche Optimum anstreben. Ihre Einschätzung der untersuchten Maßnahmen entspricht damit dem Ergebnis der Kosten-Wirksamkeitsanalyse.

Unabhängig davon, ob der Betreiber eines Tunnels privatwirtschaftlich oder öffentlich organisiert ist, hat er ein Interesse daran, für einen hohen Sicherheitsstandard in seinen Tunneln zu sorgen. Im Falle eines schweren Unfalls treten erhebliche Kosten auf, wobei für Rettung und Bergung der Opfer meist öffentliche Institutionen wie Rettungsdienste, Katastrophenschutz und Polizei zuständig sind. Auch übergeordnete Aufgaben wie das Verkehrsmanagement im Einzugsgebiet des Tunnels sowie bi-nationale Abkommen bei Grenztunneln gehören in den öffentlichen Bereich.³⁴⁴ Für privatwirtschaftliche Betreiber spielen wirtschaftliche Erwägungen eine größere Rolle als für öffentliche Institutionen und eine längere Tunnelsperrung führt zu erheblichen Einnahmeausfällen. Im Falle des Mont Blanc-Tunnels betrugen die Ausfälle nach dem schweren Unfall 1999 ca. 203 Millionen Euro.³⁴⁵

Neue Systeme oder Maßnahmen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit von Tunneln sind damit sowohl für öffentliche als auch für private Tunnelbetreiber von Interesse. Klar im Vordergrund stehen dabei allerdings Systeme und Maßnahmen, die die Sicherheit des Tunnels an sich erhöhen. Fahrzeugbasierte Maßnahmen sind weniger von Interesse, es sei denn, sie bieten im Zusammenspiel mit den Tunnelsystemen einen Mehrwert.

6.2.2. Fahrzeughersteller

Kooperative Systeme bzw. neuartige Fahrerassistenzsysteme allgemein stellen für Fahrzeughersteller bzw. Systemzulieferer wirtschaftlich und technisch sowohl Risiko als auch Chance dar. Die Kosten für Entwicklung, Produktion und Vermarktung solcher Systeme werden zunächst von den Herstellern getragen und müssen durch entsprechende Erlöse am Markt ausgeglichen werden, um die Investitionen rentabel zu machen. Die Ausstattung der Fahrzeuge mit erweiterten Sicherheitssystemen verursacht dabei höhere Fahrzeugpreise, was zu geringeren Verkaufszahlen führen kann. Gleichzeitig sorgen solche Systeme aber dafür, dass die ausgestatteten Fahrzeuge als hochwertiger und sicherer empfunden werden, was sich positiv auf die Verkaufszahlen auswirken kann. Welcher dieser beiden Effekte überwiegen wird, lässt sich im Vorhinein nur schwierig abschätzen, so dass die Hersteller das Risiko ausbleibenden Markterfolges zu tragen haben. Im schlimmsten Fall treten nach einer positiven Einführungsphase technische Probleme auf, die zu teuren Rückrufaktionen und Imageverlust führen.³⁴⁶

³⁴⁴ Kleine, J.; Lotz, C.; Wiethoff, M. et al. (Hrsg.): IN-SAFETY: Policy Recommendations. Deliverable D5.4, 2008, S. 12.

³⁴⁵ Münchner Rück: Risk Management Tunnel. München, 2003, S. 11.

³⁴⁶ Assing, K.; Baum, H.; Bühne, J. et al.: eIMPACT: Methodological Framework and Database for Socio-economic Evaluation of Intelligent Vehicle Safety Systems. Deliverable D3, 2006, S. 106. Vgl. auch Abele, J.; Kerlen, C.; Krüger, S. et al.: SEISS: Exploratory Study on the Potential Socio-economic Impact of the Introduction of Intelligent Safety Systems in Road Vehicles. Teltow, 2005, S. 90.

Das Risiko der Markteinführung lässt sich für die Hersteller damit anhand der drei Aspekte

- wirtschaftliches Risiko – Abhängigkeit des Return on Investment vom erzielten Marktpreis und der Anzahl der verkauften Einheiten,
- Produktrisiko – Zuverlässigkeit des neuen Systems und
- Rückrufisiko – Höhe der Kosten, die mit einer Rückrufaktion verbunden wären

charakterisieren. In Abhängigkeit von den Systemeigenschaften sind die in Abbildung 19 skizzierten Szenarien denkbar.

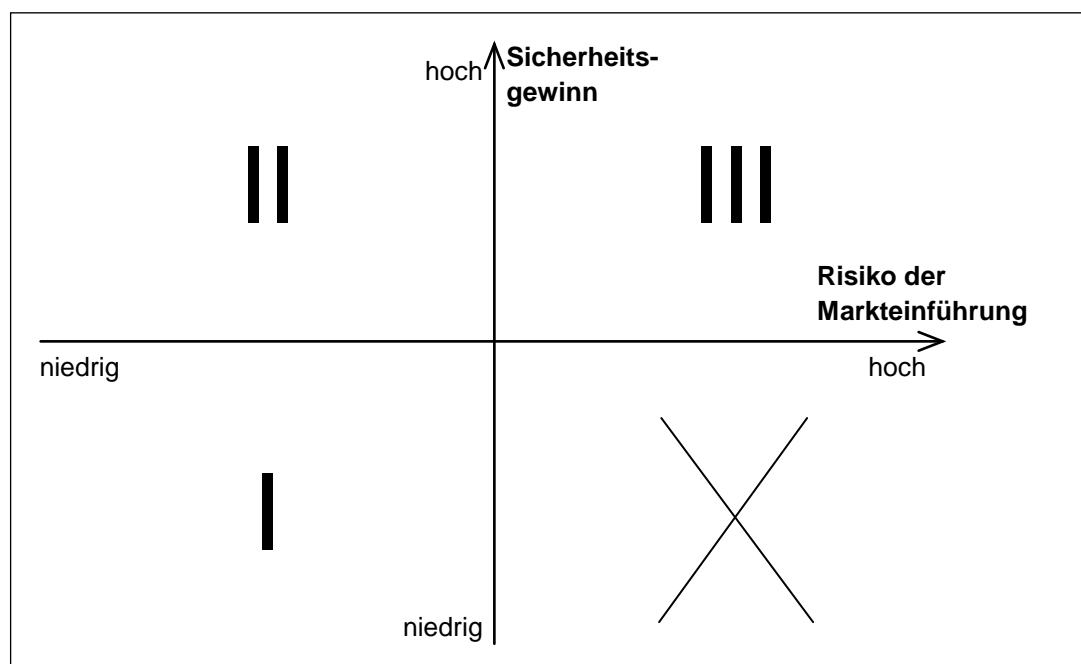


Abbildung 19: Risikokonstellationen bei der Markteinführung³⁴⁷

Für den Hersteller am günstigsten ist Fall I, in dem das Risiko der Markteinführung niedrig ist. Da der Sicherheitseffekt jedoch ebenfalls gering ist, ist das Interesse der Käufer beschränkt, so dass die Einführung eines solchen Systems von Herstellerseite aus getrieben wird. Kann jedoch angenommen werden, dass die Käufer an dem System interessiert sind, da es eine hohe Sicherheitswirkung verspricht, liegt Fall II vor, in dem der Hersteller von einer hohen Nachfrage ausgehen kann, was das Risiko der Markteinführung verringert. Etwas schwieriger ist die Situation im Fall III. Das Risiko für den Hersteller ist groß, z. B. weil es sich um die erste Serienanwendung einer neuen Technologie handelt. Selbst wenn diese neue Technologie einen hohen Sicherheitsgewinn erwarten lässt und die Käufer Interesse signalisieren, kann der Hersteller dennoch zu dem Ergebnis kommen, dass das Risiko der Einführung zu groß ist. In einem solchen Fall kann es sinnvoll

³⁴⁷ In Anlehnung an Abele, J.; Kerlen, C.; Krüger, S. et al.: SEISS: Exploratory Study on the Potential Socio-economic Impact of the Introduction of Intelligent Safety Systems in Road Vehicles. Teltow, 2005, S. 54.

sein, die Einführung des Systems von staatlicher Seite aus zu unterstützen, bspw. durch Subventionen oder eine gesetzgeberische Maßnahme.³⁴⁸

Im Falle eines hohen Risikos bei gleichzeitig geringer Erwartung an den Sicherheitsgewinn ist davon auszugehen, dass der Hersteller auf die Markteinführung bzw. Entwicklung und Produktion des neuen Systems verzichtet, siehe „x“.

Die Einschätzung durch die Hersteller, in welche Kategorie eine neue Technologie bzw. ein neues System fällt, beruht zum einen auf ihrer technischen Expertise. Die Produktentwicklung stützt sich zum anderen jedoch auf Umfragen und Studien, die ermitteln sollen, worin die Bedürfnisse der Endnutzer bestehen und was sie bereits sind, für neue Systeme zu bezahlen.³⁴⁹

6.2.3. Tunnelnutzer

Die größte Bedeutung für die Stakeholder-Analyse der ausgewählten Systeme kommt den Tunnelnutzern zu. Ihre Akzeptanz ist entscheidend, da sie sowohl Einfluss auf die öffentliche Hand als auch die privatwirtschaftlichen Unternehmen ausüben. Auf der einen Seite handelt es sich dabei um ihre Rolle als Wähler, die von der öffentlichen Hand zu berücksichtigen ist, auf der anderen Seite um ihre Rolle als Käufer und Nutzer von Systemen, die von Unternehmen angeboten werden. Ohne Akzeptanz der Tunnelnutzer respektive ihre Kaufbereitschaft gibt es kaum Möglichkeiten zur erfolgreichen Einführung und Durchsetzung der Systeme. Aus diesem Grund wird die Interessenslage dieser Gruppe im Folgenden detailliert dargestellt.

6.2.3.1. Stellenwert der Sicherheit

Sicherheit hat für Pkw-Fahrer einen hohen Stellenwert, wie verschiedene Untersuchungen zeigen. Im Rahmen des Projekts CVIS, *Cooperative Vehicle-Infrastructure Services*, wurde beispielsweise eine Befragung von 7.867 Personen aus 12 europäischen Ländern³⁵⁰ durchgeführt. Die Antworten wurden pro Land mit der jeweiligen Einwohnerzahl gewichtet, um ein europäisches Profil zu erhalten.³⁵¹ Oberste Priorität hat demnach beim Kauf eines Neuwagens die Sicherheit, wie Abbildung 20 zeigt, gefolgt von Kosten und Zuverlässigkeit. An vierter Stelle wird der Kraftstoffverbrauch genannt, was ein Zeichen für die zunehmende Bedeutung von Umweltaspekten sein kann, gleichzeitig aber auch eine Kostenkomponente darstellt.

³⁴⁸ Abele, J.; Kerlen, C.; Krüger, S. et al.: SEISS: Exploratory Study on the Potential Socio-economic Impact of the Introduction of Intelligent Safety Systems in Road Vehicles. Teltow, 2005, S. 55.

³⁴⁹ Mankinen, E.; Anttila, V.; Penttinen, M. et al.: ADVISORS: Actors Interests, Acceptance, Responsibilities and Users' Awareness Enhancement. Deliverable D2 V1, 2001, S. 9.

³⁵⁰ Belgien, Deutschland, Frankreich, Groß-Britannien, Italien, Kroatien, Niederlande, Norwegen, Österreich, Portugal, Schweiz und Spanien.

³⁵¹ RACC Automobile Club: CVIS: Stakeholder utility, data privacy and usability analysis and recommendations for operational guarantees and system safeguards: Europe. Deliverable D.DEPN.4.1, 2007, S. 36.

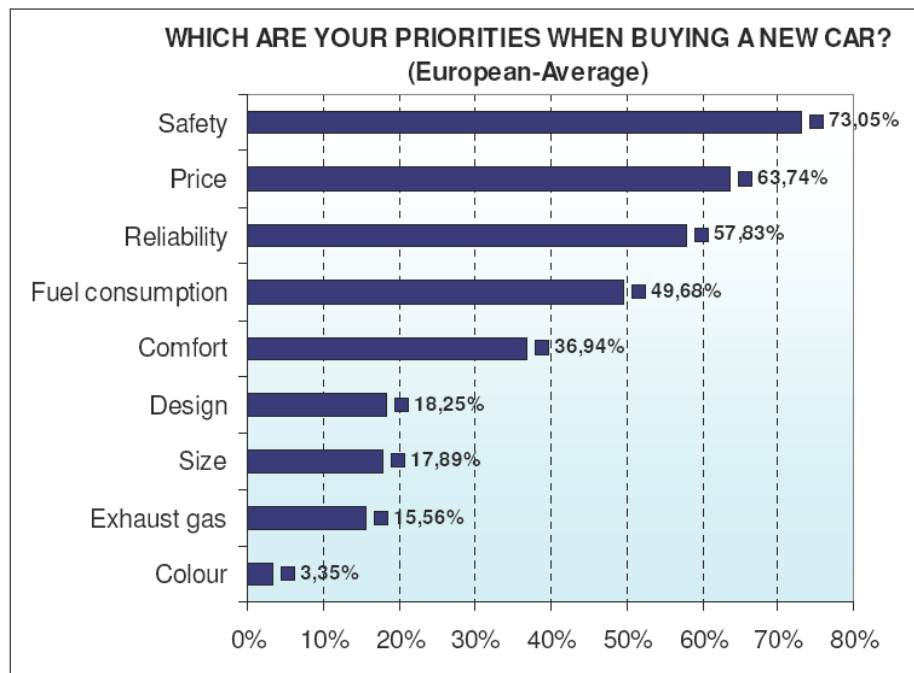


Abbildung 20: Prioritäten beim Kauf eines neuen Fahrzeugs³⁵²

Dieser Aussage über die hohe Priorität, die der Fahrzeugsicherheit eingeräumt wird, steht der schleppende Verlauf der Markteinführung neuer Systeme zur Steigerung der Sicherheit gegenüber. Dieser zeigt sich zum Beispiel bei der Marktentwicklung von Telematiksystemen, denen im Jahr 2000 erhebliches Wachstum für den Zeitraum 2006 bis 2010 vorausgesagt wurde. Bewahrheitet hat sich dies bislang nicht, was u. a. technische Gründe wie z. B. eine mangelnde Standardisierung hat.

Ein weiterer Erklärungsansatz ist psychologischer Natur und bezieht sich auf das Risiko, einen Unfall zu erleiden. Viele Menschen wissen zwar, dass es Jahr für Jahr eine erhebliche Zahl an Getöteten und Verletzten im Straßenverkehr zu beklagen gibt, sind aber der Auffassung, dass sie persönlich nicht davon betroffen sein werden.³⁵³ Sie überschätzen systematisch ihre eigenen Fähigkeiten und meinen, durch umsichtiges Verhalten das Eintreten eines Unfalls vermeiden zu können. Bei dieser weit verbreiteten Fehleinschätzung wird die Tatsache ausgeblendet, dass bei vielen Unfällen Menschen völlig unverschuldet zu Schaden kommen und sich solche Situationen durch „Aufpassen“ und eine vorsichtige Fahrweise nicht immer vermeiden lassen.³⁵⁴ Diese Überschätzung der eigenen Fähigkeiten spiegelt sich auch in den Ergebnissen von Probandenstudien wider, z. B. in einem Feldtest der National Highway Safety Administration, in dem ein Kollisionsvermeidungssystem erforscht wurde. Die Mehrzahl der Probanden gab hinterher an, dass das System sinnvoll sei und die Sicherheit erhöhe. Sie könnten sich gut vorstellen, dass ein solches System für andere Fahrer gut wäre, sie selbst würden es jedoch nicht brauchen, da sie

³⁵² RACC Automobile Club: CVIS: Stakeholder utility, data privacy and usability analysis and recommendations for operational guarantees and system safeguards: Europe. Deliverable D.DEPN.4.1, 2007, S. 13.

³⁵³ eSafety Forum: Final Report and Recommendations of the Implementation Road Map Working Group. Brüssel, 2005, S. 19.

³⁵⁴ Fritsch, M.; Wein, T.; Ewers, H.: Marktversagen und Wirtschaftspolitik. Mikroökonomische Grundlagen staatlichen Handelns. Vahlen, München, 2007, S. 358.

aufmerksam und sicher führen. Ältere Fahrer sagten dabei, dass jüngere davon am meisten profitieren würden, während die jüngeren das genau umgekehrt sahen.³⁵⁵

Auffällig ist auch, dass eine Diskrepanz besteht zwischen dem Anteil der Fahrer, die von sich sagen, dass sie schneller als der Durchschnitt fahren und dem Anteil derjenigen, die sagen, dass sie eine gefährlichere Fahrweise als andere haben. Schneller als der Durchschnitt fahren nach eigenen Angaben 18 % der befragten EU-Bürger³⁵⁶, doch nur 4 % empfinden ihre Fahrweise als gefährlicher als die anderer Fahrer. Dies wird durch die Befragten damit begründet, dass sie im Vergleich zu anderen bessere Autofahrer seien, so dass sie also schneller und dennoch sicherer fahren könnten.³⁵⁷

Ein weiterer Erklärungsansatz für die begrenzte Bereitschaft der Pkw-Fahrer, trotz des hohen Stellenwerts von Sicherheit in neuartige Systeme zu investieren, könnte die hohe passive Sicherheit heutiger Fahrzeuge sein. Im Vergleich zu älteren Modellen werden moderne Fahrzeuge aufgrund ihrer Ausstattung mit Airbags, Gurtstraffern, crashoptimierter Fahrgastzellen etc. als deutlich sicherer empfunden. Die zusätzliche Sicherheit, die aktive Systeme bieten würden, scheint unter diesen Voraussetzungen für die Kaufentscheidung nur noch von geringerer Bedeutung zu sein. Die Käufer wollen demnach ein sicheres Fahrzeug, aber nicht unbedingt ein nach dem Stand der Technik maximal sicheres Fahrzeug.

6.2.3.2. Nutzen-Wahrnehmung

In einer Studie der Europäischen Kommission zum Thema *Use of Intelligent Vehicle Systems* wurde eine repräsentative Umfrage in den damals 25 Mitgliedsstaaten³⁵⁸ durchgeführt. Insgesamt wurden zwischen 7. Juni und 12. Juli 2006 24.796 EU-Bürger, die mindestens 15 Jahre alt waren, befragt. Im jeweiligen Land wurden in allen Regionen – großstädtisch, städtisch, ländlich – zufällig Befragte ausgewählt und in persönlichen Interviews zu ihrem Fahrverhalten (privat, beruflich, Fahrleistung pro Jahr etc.) und ihren Ansichten in Bezug auf neuartige Fahrzeugsicherheitssysteme befragt. Gegenstand der Befragung waren sowohl fahrzeugautonome als auch infrastrukturgestützte Systeme,³⁵⁹ darunter ABS, ESP, Speed Alert, eCall sowie Echtzeitverkehrs- und Reiseinformationen.

Die Befragung ergab, dass die Mehrheit der EU-Bürger die genannten Systeme als nützlich einschätzt und sie kaufen würde, siehe Abbildung 21. Den größten Nutzen sahen sie mit 80 % bei ABS, das 75 % auch kaufen würden, den geringsten mit 67 % bzw. 52 % bei

³⁵⁵ University of Michigan Transportation Research Institute and General Motors Research and Development Center: Automotive Collision Avoidance System Field Operational Test Report - Methodology and Results. DOT HS 809 900. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, 2005, S. 14-15.

³⁵⁶ Bei den befragten Nicht-EU-Bürgern waren es sogar 22 %.

³⁵⁷ SARTRE Consortium: European Drivers and Road Risk - Part 1: Report on Principle Analyses. 2004, S. 49-51.

³⁵⁸ Belgien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Großbritannien, Irland, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Österreich, Polen, Portugal, Schweden, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechien, Ungarn und Zypern. Rumänien und Bulgarien waren zu diesem Zeitpunkt noch nicht Mitglied der Europäischen Union, sie traten am 1. Januar 2007 bei.

³⁵⁹ European Commission (Hrsg.): Use of intelligent systems in vehicles. Special Eurobarometer 267. 2006, S. 17.

Lane Departure Warning. Lane Departure Warning, das insgesamt am schlechtesten abschneidet, möchte ein Drittel der Befragten nicht im eigenen Fahrzeug haben.³⁶⁰

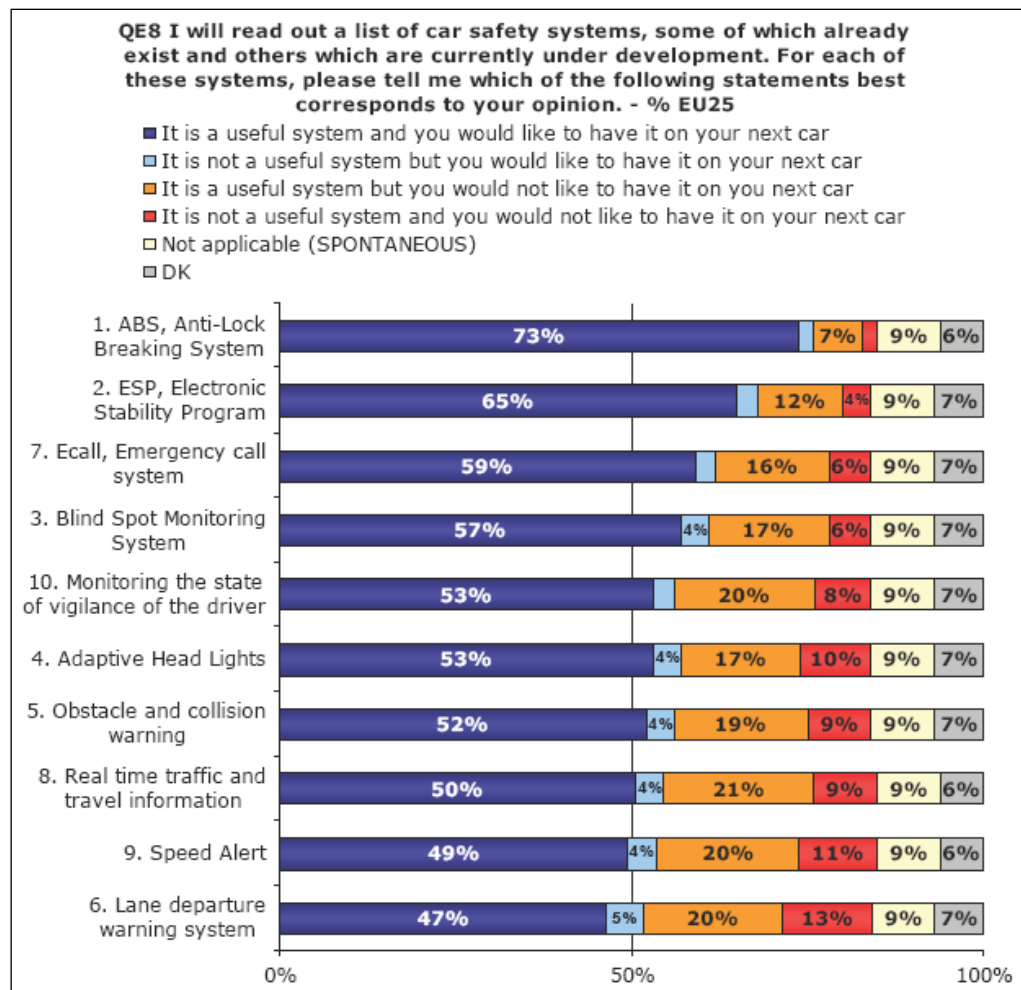


Abbildung 21: Wahrgenommener Nutzen von intelligenten Fahrzeugsystemen³⁶¹

Weitere Fragen im Rahmen dieser Studie befassten sich mit der Diskrepanz zwischen dem erwarteten Nutzen der Befragten und der verhältnismäßig geringen Ausstattungsrate. Hier zeigte sich unabhängig von der Nationalität der Befragten, dass die Preise der Systeme als zu hoch empfunden werden. Insgesamt wurde der zu hohe Preis von 51 % der Befragten genannt, davon von 34 % als wichtigster und von 19 % als zweitwichtigster Grund. An zweiter Stelle rangiert die Furcht vor unzuverlässiger Elektronik, die insgesamt von 22 % der Befragten geäußert wurde, von 11 % an erster und 16 % an zweiter Stelle. Weitere Gründe für die Kaufzurückhaltung sind in Abbildung 22 zu sehen.

³⁶⁰ European Commission (Hrsg.): Use of intelligent systems in vehicles. Special Eurobarometer 267. 2006, S. 19.

³⁶¹ Ebenda.

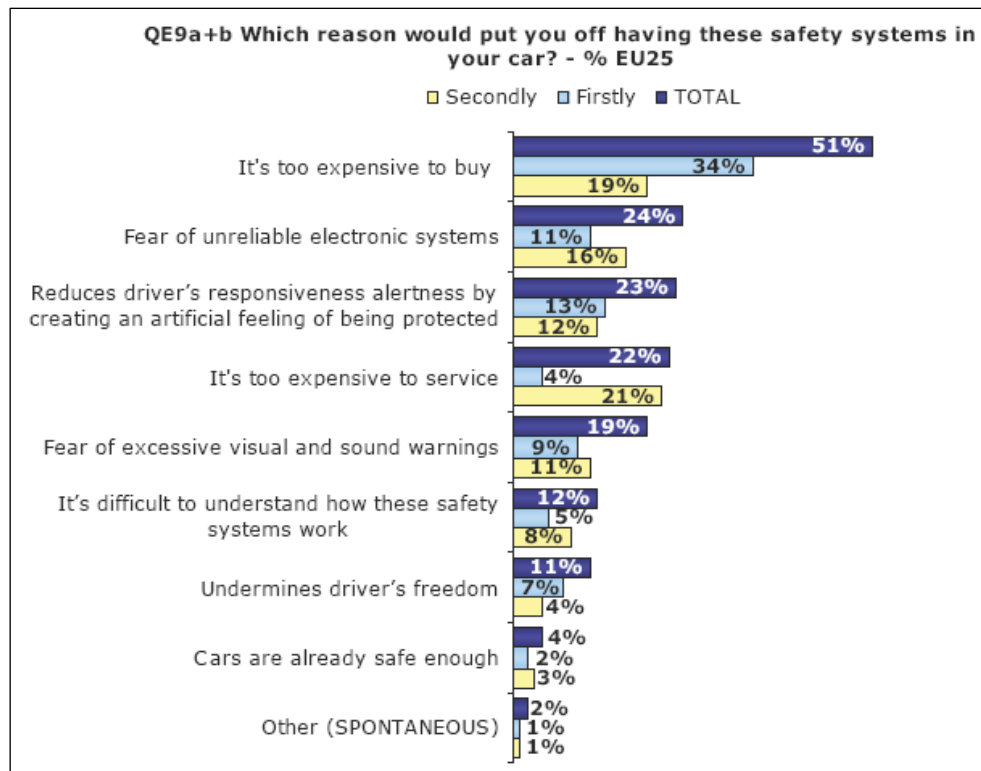


Abbildung 22: Gründe, die die Befragten daran hindern, intelligente Fahrzeugsicherheitssysteme zu kaufen³⁶²

6.2.3.3. Zahlungsbereitschaft

Generell ist die Aussage, dass ein System als nützlich empfunden wird, nicht mit einer vorhandenen Zahlungsbereitschaft zu verwechseln, wie Abbildung 23 zeigt. Sie basiert auf Daten, die ebenfalls im o. g. CVIS-Projekt erhoben wurden. Die Akzeptanz für ein System geht durchschnittlich um 25 % zurück, wenn der potentielle Nutzer nicht allgemein nach der Nützlichkeit des System gefragt wird, sondern ob er bereit wäre, dafür zu zahlen.³⁶³

Die in Abbildung 23 angegebenen Systeme zählen zu den infrastrukturbasierten. Untersuchungen zu fahrzeugautonomen Systeme kommen jedoch zu ähnlichen, z. T. weit unterhalb der Verkaufspreise liegenden Ergebnissen. Tabelle 40 zeigt beispielsweise das Ergebnis einer Umfrage, für die jeweils 500 Autofahrer in der Schweiz und in Deutschland befragt wurden. Die Mehrheit (39 bzw. 34 %) würde maximal 1.000 € zusätzlich zu den Basiskosten eines neuen Fahrzeugs für Fahrerassistenzsysteme ausgeben – allerdings nicht für ein einziges System, sondern für die gesamte Ausstattung des Fahrzeugs mit Fahrerassistenzsystemen. Bei insgesamt rund 21 % beträgt die Zahlungsbereitschaft weniger als 400 €

³⁶² European Commission (Hrsg.): Use of intelligent systems in vehicles. Special Eurobarometer 267. 2006, S. 47.

³⁶³ RACC Automobile Club: CVIS: Stakeholder utility, data privacy and usability analysis and recommendations for operational guarantees and system safeguards: Europe. Deliverable D.DEPN.4.1, 2007, S. 17.

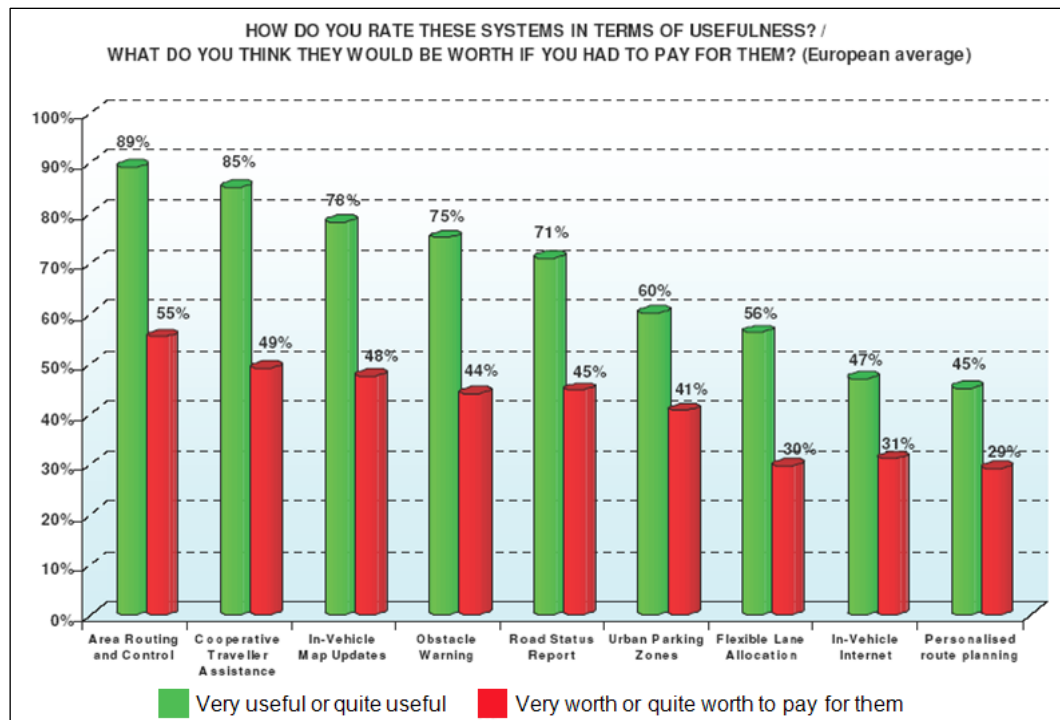


Abbildung 23: Einschätzung von Nützlichkeit i. V. m. Zahlungsbereitschaft³⁶⁴

Tabelle 40: Zahlungsbereitschaft für Fahrerassistenzsysteme zusätzlich zu den Basiskosten für ein neues Auto in Deutschland und der Schweiz 2006³⁶⁵

	< 400 €	400-1.000 €	1.001-2.000 €	2.001-3.000 €	> 3.000 €	weiß nicht
Schweiz	27 %	39 %	19 %	4 %	1 %	9 %
Deutschland	14 %	34 %	19 %	5 %	6 %	9 %

Noch geringere Werte für die Zahlungsbereitschaft ergab die SafeCar-Studie des Monash University Accident Research Centre, in der die Probanden angaben, dass sie nicht mehr als jeweils 275 AU\$ (ca. 160 Euro) für die getesteten Systeme zahlen würden. Dabei handelte es sich um Reverse Collision Warning (RCW), Following Distance Warning (FDW), Seat Belt Reminder (SBR) und Intelligent Speed Adaptation (ISA). Dieses Ergebnis ist bemerkenswert, da die Probanden die Systeme jeweils über mindestens 16.500 km erprobt hatten und sie als akzeptabel genug einschätzten, um sie behalten zu wollen. Für ein etwaiges Nachrüsten ihrer vorhandenen Fahrzeuge betrug die Zahlungsbereitschaft nur 50 AU\$ (30 Euro) und für eine jährliche Wartung der Systeme bestand keinerlei Zahlungsbereitschaft.³⁶⁶

Die Befragung von Probanden oder potentiellen Käufern auf Basis von Systempreisen kann allerdings zu Fehleinschätzung führen. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn mehrere Systeme einzeln abgefragt werden. Auf diese Weise wird z. B. für System 1 eine

³⁶⁴ RACC Automobile Club: CVIS: Stakeholder utility, data privacy and usability analysis and recommendations for operational guarantees and system safeguards: Europe. Deliverable D.DEPN.4.1, 2007, S. 15.

³⁶⁵ Winterthur Group: Pressemitteilung: Mehr Elektronik im Auto - mehr Sicherheit im Verkehr? 2006, S. 5

³⁶⁶ Regan, M.; Triggs, T.; Young, K. et al.: On-road Evaluation of Intelligent Speed Adaptation, Following Distance Warning and Seatbelt Reminder Systems. Final Results of the TAC SafeCar Project. Report No. 253. Monash University Accident Research Centre, Victoria, 2006, S. 237.

Zahlungsbereitschaft von 1.000 € ermittelt und für System 2 von 1.400 € Nicht berücksichtigt wird dabei aber, dass für die Kaufentscheidung der Gesamtpreis des Fahrzeugs entscheidend ist und der Käufer unter Umständen nicht bereit ist, 2.400 € für Fahrerassistenzsysteme zu bezahlen. Diese Verzerrung kann mit dem Prinzip der marginalen Preise vermieden werden. Der marginale Preis eines Ausstattungsmerkmals ist dabei definiert als der Preis, zu dem das Haben oder Nicht-Haben des zusätzlichen Merkmals gleich viel wert sind. Das bedeutet, dass z. B. ein Fahrzeug für 20.000 € ohne Navigationssystem für den durchschnittlichen Käufer genau so attraktiv ist wie ein Fahrzeug für 20.260 € mit Navigationssystem. In diesem Fall beträgt der marginale Preis des Navigationssystems 260 €³⁶⁷

Eine Befragung von Fahrzeugkäufern in den USA, Großbritannien, Frankreich und Deutschland ergab die folgenden marginalen Preise:

Tabelle 41: Marginale Preise unterschiedlicher Fahrerassistenzsysteme, Befragung in den USA, Großbritannien, Frankreich und Deutschland³⁶⁸

System	Durchschnittlicher marginaler Preis
Lane Departure Warning	250 €
Adaptive Cruise Control	245 €
Adaptive Cruise Control + Collision Avoidance	200 €
ESP	190 €
On Board Navigation + Road Traffic Information (RTI)	280 €
Schlüsselloser Zutritt	260 €
Rückfahrkamera	100 €

Auffällig ist, dass der durchschnittliche marginale Preis von Adaptive Cruise Control inkl. Collision Avoidance mit 200 € niedriger liegt als für Adaptive Cruise Control allein, 245 €. Dies könnte ein Zeichen dafür sein, dass neuartige, eingreifende Fahrerassistenzsysteme auf Vorbehalte stoßen.

Tabelle 41 zeigt Durchschnittswerte, denn der marginale Preis eines Systems ist abhängig von Käufertyp (Innovatoren, Frühe Adoptoren, Frühe Mehrheit, Späte Mehrheit oder Nachzügler?³⁶⁹), Fahrzeugsegment³⁷⁰, jährlicher Fahrleistung³⁷¹ und anderen Faktoren. Eine wichtige Rolle spielt auch das Haushaltseinkommen bzw. die Entwicklung der Haushaltseinkommen und der Neuwagenpreise.

³⁶⁷ Riches, I.; Webber, C.: Advanced Safety Systems - Who Wants Them, and How Much will They Pay? VDI Berichte Nr. 2000, S. 685-694. VDI, Düsseldorf, 2007, S. 687.

³⁶⁸ Riches, I.; Webber, C., a. a. O., S. 693.

³⁶⁹ Schmidt, S.: Die Diffusion komplexer Produkte und Systeme. Ein systemdynamischer Ansatz. Gabler, Wiesbaden, 2009, S. 28.

³⁷⁰ Grawenhoff, S.: Ökonomische Bewertung von Fahrerassistenzsystemen. Methodische Grundlagen und empirische Analysen am Beispiel der Stau- und Querführungsassistenz. Herbert Baum Buchreihe des Instituts für Verkehrswissenschaft an der Universität zu Köln Nr. 62. Verkehrsverlag Fischer, 2006, S. 178.

³⁷¹ Grawenhoff, S., a. a. O., S. 117.

Zwischen 1980 und 2009 sind die durchschnittlichen Listenpreise für Neufahrzeuge in Deutschland von 8.420 € auf 21.430 € gestiegen.³⁷² Diese im Vergleich zur Einkommensentwicklung überdurchschnittliche Preissteigerung hat zur Folge, dass seit Ende der 80er Jahre von Privathaushalten mehr Gebrauchtwagen als Neufahrzeuge gekauft werden, siehe Abbildung 24. Im Jahr 2008 betrug der Anteil von privaten Haushalten mit Neufahrzeug nur noch 31 % und hatte damit den niedrigsten Wert seit der ersten Befragung im Jahr 1973 (33 %) erreicht.³⁷³

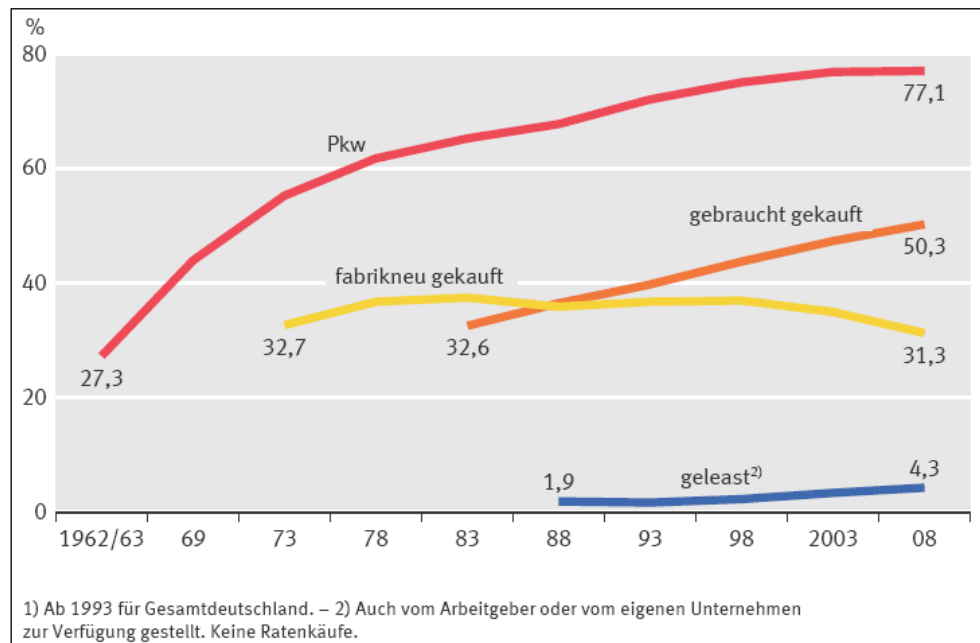


Abbildung 24: Ausstattungsgrad privater Haushalte mit Pkw³⁷⁴

Dies gilt ebenso für Österreich, wo die fahrzeugbezogenen Aufwendungen, d. h. Betriebskosten und Wertverlust der Fahrzeuge, seit einigen Jahren ebenfalls schneller ansteigen als die Durchschnittseinkommen, siehe Abbildung 25.

Vor diesem Hintergrund ist nachvollziehbar, dass viele Fahrer beim Kauf eines Fahrzeugs auf teure Sonderausstattung verzichten und generell eine Verlagerung zu kleineren, günstigeren Fahrzeugen stattfindet. Diese Entwicklung zeigt sich deutlich daran, welche Fahrzeugtypen von der Umweltprämie („Abwrackprämie“) in Deutschland am stärksten profitierten. Laut einer Studie des Instituts für Energie- und Umweltforschung (ifeu) wurden 84 % der Abwrackprämie zum Kauf von Pkw der Segmente Minis (z. B. Fiat Panda), Kleinwagen (z. B. VW Polo) und Kompaktklasse (z. B. Opel Astra) genutzt. Der Anteil dieser Fahrzeuge an allen Neuzulassungen stieg damit im Zeitraum Januar-Juli 2009 um

³⁷² Focus online: Preis von Neuwagen erstmals seit Jahren gesunken.

http://www.focus.de/finanzen/news/auto-preis-von-neuwagen-erstmals-seit-jahren-gesunken_aid_43748.html, abgerufen am 11. Oktober 2009.

³⁷³ Statistisches Bundesamt: Zuhause in Deutschland. Ausstattung und Wohnsituation privater Haushalte. Wiesbaden, 2009, S. 17.

³⁷⁴ Ebenda.

das 2,5fache bezogen auf den gleichen Zeitraum des Vorjahres. Dies entspricht einem Plus von 680.000 Fahrzeugen.³⁷⁵

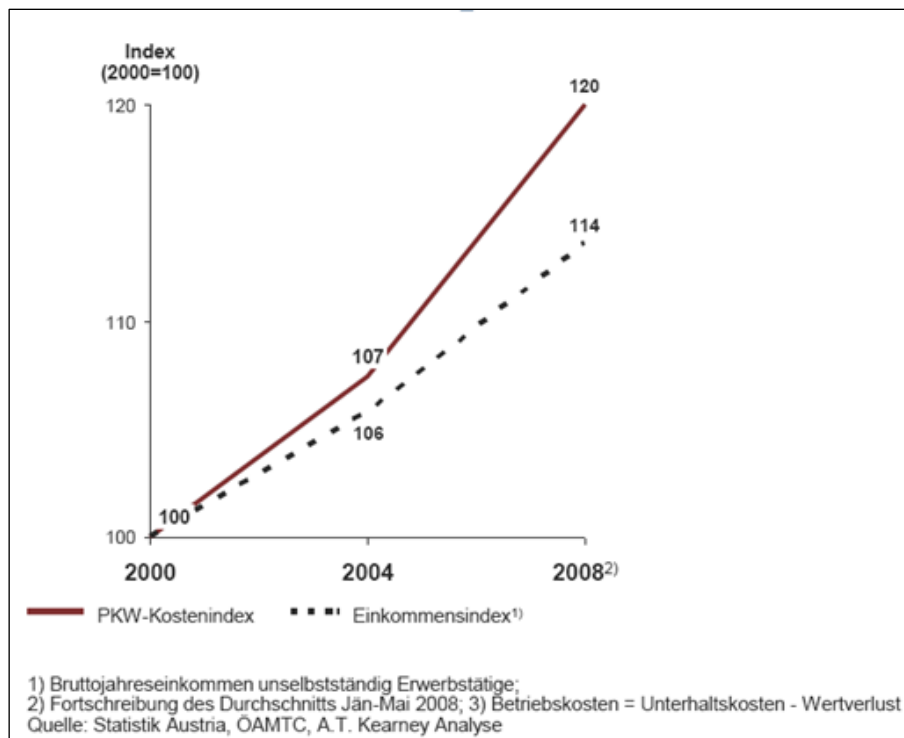


Abbildung 25: Vergleich Pkw-Kosten und Einkommen in Österreich³⁷⁶

Sollte diese Verlagerung zu kleineren, günstigeren Fahrzeugen sich fortsetzen, wird die weitere Verbreitung von Fahrerassistenzsystemen sich verlangsamen, da sie für diese Fahrzeugklassen bislang zu teuer sind und diese Käufergruppe wenig Wert auf sie legt. Es gibt darüber hinaus bereits Prognosen, dass sich auch in Europa ein Billigstfahrzeugsegment mit Fahrzeugen unter 6.000 € etablieren könnte, siehe Abbildung 26.

Der Umstieg auf kleinere Fahrzeuge ist jedoch nicht allein durch die Preis- und Einkommensentwicklung getrieben, die Verkaufszahlen von Oberklassefahrzeugen sind in westlichen Kulturen auch aufgrund eines Wertewandels rückläufig.³⁷⁷ Zwischen 2005 und 2008 nahmen sie um mehr als 40 % ab, während der Rückgang in den anderen Segmenten weniger als 10 % betrug.³⁷⁸ Bereits 46 % der Deutschen werden der Gruppe der sog. Postmaterialisten zugeordnet, denen individuelle Selbstentfaltung wichtiger ist als Status-

³⁷⁵ Höpfner, U.; Hanusch, J.; Lambrecht, U.: Abwrackprämie und Umwelt - eine erste Bilanz. Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg, 2009, S. 7.

³⁷⁶ Mayer, S.; Pleines, R.; Branschädel, J.: Auto 2020, Billigautos erobern den Markt.

http://www.atkearney.at/content/veroeffentlichungen/whitepaper_practice.php/practice/automotive/id/50046, abgerufen am 11. Oktober 2009.

³⁷⁷ PricewaterhouseCoopers Automotive Institute: Zukunft in Bewegung. Die Automobilindustrie im Spannungsfeld zwischen neuen Chancen und alten Strukturen. Hannover/Stuttgart, 2010, S. 58.

³⁷⁸ PricewaterhouseCoopers Automotive Institute, a. a. O., S. 15.

symbole. Für diese Menschen ist das Auto ein funktionaler Gegenstand und kein soziales Differenzierungsmerkmal.³⁷⁹

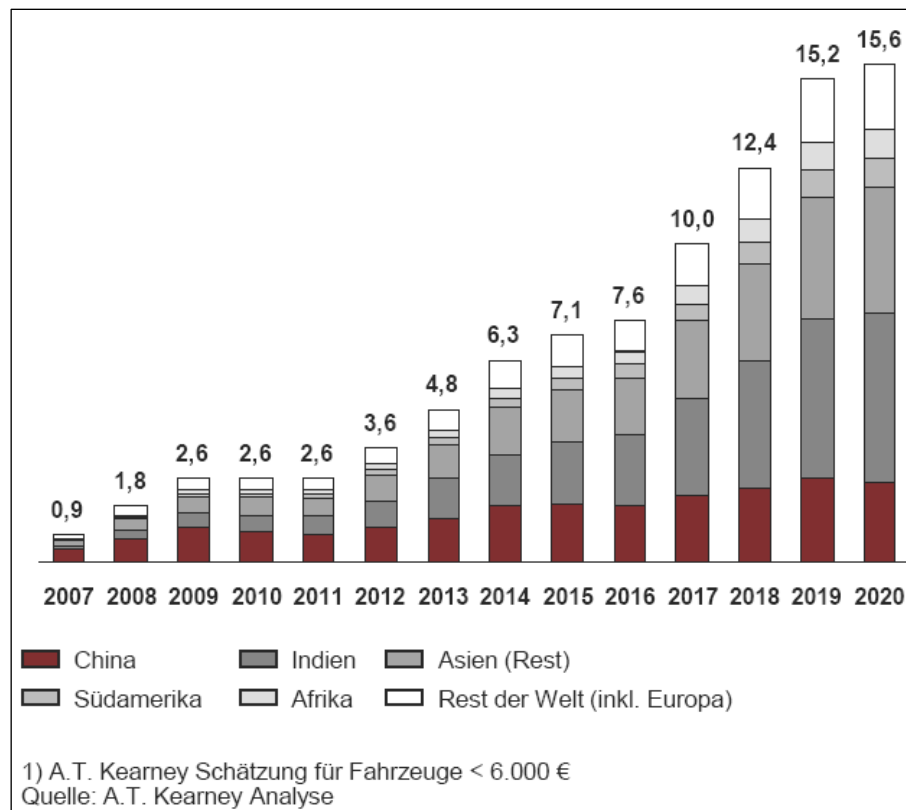


Abbildung 26: Erwarteter Absatz Billigstfahrzeuge 2007-2020³⁸⁰

6.2.3.4. Zuverlässigkeit und Systemverständnis

„Es besteht ein großer Unterschied in der Einstufung elektronischer Features zwischen OEM und Endkunden.“³⁸¹

Die Angst vor einem unzuverlässigen elektronischen System wurde laut Abbildung 22 am zweithäufigsten als Begründung dafür genannt, warum die Befragten intelligente Fahrzeugsicherheitssysteme nicht kaufen würden. Diese Befürchtungen sind nachvollziehbar, da Probleme mit Elektrik/Energieversorgung in der jährlichen Pannenstatistik seit einigen Jahren den Spitzenplatz einnehmen.³⁸²

³⁷⁹ PricewaterhouseCoopers Automotive Institute: Zukunft in Bewegung. Die Automobilindustrie im Spannungsfeld zwischen neuen Chancen und alten Strukturen. Hannover/Stuttgart, 2010, S. 58.

³⁸⁰ Mayer, S.; Pleines, R.; Branschädel, J.: Auto 2020, Billigautos erobern den Markt. http://www.atkearney.at/content/veroeffentlichungen/whitepaper_practice.php/practice/automotive/id/50046, abgerufen am 11. Oktober 2009, S. 14.

³⁸¹ Mayer, H.: Neue Anforderungen an das Technologiemanagement. Systemintegration von Mechanik und Elektronik. Meinig, Mallad, 1999, S. 204. Nach: Müller-Merbach, H.: Betriebs- und volkswirtschaftliche Aspekte der automatischen Geschwindigkeitskontrolle von Kraftfahrzeugen. In: Topp, H. (Hrsg.): Intelligent Speed Adaptation - Expertenstatements. Fachgebiet Mobilität & Verkehr der Technischen Universität Kaiserslautern, 2004, S. 148.

³⁸² Laut ADAC-Pannenstatistik 2009 waren in 40 % der Fälle und damit am häufigsten Probleme mit der Elektrik/Energieversorgung der Fahrzeuge die Pannursache. Siehe Die Welt: Diese Autos machen den

Hinzu kommt, dass das Verständnis der Funktionsweise neuartiger Fahrzeugsicherheitssysteme außerhalb der Automobilbranche gering ist. Die Sicherheitsstudie des Automobilzulieferers Continental aus dem Jahr 2006 zeigt, dass von den befragten Frauen 58,5 % und von den Männern 30,8 % den Begriff Fahrerassistenzsystem noch nie gehört hatten.³⁸³ Dies ist für Fahrerassistenzsysteme insbesondere deshalb negativ, weil sie mehr technisches Verständnis, vor allem für die Funktionsgrenzen, voraussetzen als die Bedienung der herkömmlichen Pkw-Funktionen.

6.2.3.5. Schlussfolgerung

Es bleibt festzuhalten, dass für die Stakeholder Tunnelnutzer Sicherheit ein wichtiger Aspekt ist, sie aufgrund eines überhöhten Vertrauens in die eigenen Fähigkeiten jedoch häufig der Ansicht sind, Sicherheitssysteme nicht zu benötigen. Dies hat zur Folge, dass ihre Bereitschaft, in solche Systeme zu investieren, relativ gering ist, selbst wenn sie auf abstrakte Weise als nützlich empfunden werden. Die Preise, zu denen die Systeme angeboten werden, werden daher häufig als zu hoch angesehen. Hinzu kommen Vorbehalte gegenüber elektronischen Systemen, die vielfach als unzuverlässig eingeschätzt werden.

Diese begrenzte Bereitschaft, in die eigene Sicherheit zu investieren, ist dabei nicht auf Fahrzeugsysteme beschränkt, sondern lässt sich auf das Fahren in Tunneln verallgemeinern. In einer Befragung, die im Rahmen des Projekts SafeTunnel unter 212 Nutzern des Fréjus-, Pfänder- und Arlbergtunnels durchgeführt wurde, gaben nur 45 % an, dass sie bereit wären, eine höhere Maut zu zahlen, wenn dadurch die Sicherheit des Tunnels erhöht würde. Die zuvor in Fahrversuchen und Simulationen erprobten zusätzlichen Sicherheitssysteme wurden zwar durchgängig als eher nützlich und sicherheitssteigernd empfunden, zahlen würde die Mehrheit der Befragten jedoch nicht dafür.³⁸⁴

6.3. Einschätzung der Systeme aus Sicht der Stakeholder

Im Folgenden wird die Einschätzung der ausgewählten Systeme durch die identifizierten Stakeholder anhand der oben geschilderten Motiv- und Interessenslagen vorgenommen. Dies geschieht anhand einer Skala mit den Werten *negativ*, *indifferent* und *positiv*.

6.3.1. Öffentliche Tunnelbetreiber

Öffentliche Tunnelbetreiber entsprechen weitgehend politischen Institutionen bzw. hängen von diesen ab. Es wird daher angenommen, dass eine Bewertung der ausgewählten Maßnahmen zur Erhöhung der Tunnelsicherheit aus Sicht dieser Gruppe dem Ergebnis

meisten Ärger. Die ADAC-Pannenstatistik. <http://www.welt.de/motor/article3565263/Diese-Autos-machen-den-meisten-Aerger.html>, abgerufen am 10. Oktober 2009.

³⁸³ Continental: Sicherheitsstudie 2007.

http://www.conti-online.com/generator/www/com/de/continental/portal/themen/hidden/presse_services/sicherheitsoffensive/mediendienst/md_2007_05_04_1_de.html, abgerufen am 1. Februar 2010.

³⁸⁴ Oltersdorf, K.; Mayer, B.: Safe Tunnel: User Needs Analysis. 1st Workshop Preventive Safety in Road Tunnels, 12. Dezember 2002 in Orbassano, S. 15-16.

der Kosten-Wirksamkeitsanalyse entspricht, die das gesamtgesellschaftliche Optimum zum Ziel hat, siehe Tabelle 42.

Tabelle 42: Ergebnis der Stakeholder-Analyse – Öffentliche Tunnelbetreiber

System	Bewertung aus Sicht der öffentlichen Tunnelbetreiber
Moving Spot Light System	<i>positiv</i>
I2C-Abstandswarnung	<i>negativ</i>
Section Control	<i>positiv</i>
Intelligent Speed Adaptation	<i>negativ</i>

In Bezug auf Section Control ist allerdings anzumerken, dass es offene rechtliche Fragen gibt. In Deutschland und u. a. auch in Norwegen³⁸⁵ besteht das Prinzip der Fahrerhaftung, Section Control zielt aber auf den Halter des Fahrzeugs ab. Eine Erfassung des Nummernschilds allein würde demnach nicht genügen, es müsste zusätzlich der Fahrer identifiziert, oder generell eine Halter- anstelle einer Fahrerhaftung eingeführt werden.

Die Identifizierung des Fahrers würde die Bedenken von Datenschützern gegen Section Control verstärken, die bereits die Speicherung des Kennzeichens für unzulässig halten. Da der Fahrer sich zum Zeitpunkt des Passierens der ersten Section Control-Station noch keine Ordnungswidrigkeit zuschulden kommen ließ, handelt es sich bei der Erfassung und Speicherung des Kennzeichens um eine Vorratsdatenspeicherung. Aus diesem Grund kam der 47. Deutsche Verkehrsgerichtstag zu dem Ergebnis, dass eine Einführung von Section Control nach deutschem Recht nicht möglich sei, sondern nur nach Schaffung entsprechender Gesetze, die Zweck und Umfang der Maßnahme klar regeln.³⁸⁶ Diese Forderung wurde im März 2008 vom Bundesverfassungsgericht bestätigt, das über zwei Vorschriften zur automatischen Kennzeichenerfassung zum Zweck des Fahndungsabgleichs zu entscheiden hatte. Die Vorschriften wurden als nicht verfassungsgemäß bewertet, weil die erfassten Kennzeichen nach dem Abgleich mit Fahndungsdaten mit negativem Ausgang nicht sofort wieder gelöscht, sondern gespeichert wurden. Dies stellt einen Eingriff in das Grundrecht auf informelle Selbstbestimmung dar, da die Daten ohne Wissen des Betroffenen für weitere Auswertungen durch staatliche Stellen genutzt werden könnten. Das Bundesverfassungsgericht hat in Absatz I.2 des Urteils allerdings auch festgestellt, dass eine elektronische Kennzeichenerfassung dann nicht verfassungswidrig ist, wenn gewährleistet wird, dass die Daten nach einem negativen Auswertungsergebnis „sofort spurlos und ohne die Möglichkeit, einen Personenbezug herzustellen, gelöscht werden“.³⁸⁷ Unter Einhaltung dieser Bedingung und ihrer Regelung in einem entsprechenden Gesetz sollte es also möglich sein, Section Control auch in Deutschland einzuführen.

³⁸⁵ Grunnan, T.; Vaa, T.; Ulleberg, P. et al.: Implications of Innovative Technology for the Key Areas in Traffic Safety: Speed, Drink Driving and Restraint Systems. Deliverable 10, Final Report, 2008, S. 40.

³⁸⁶ Deutsche Akademie für Verkehrswissenschaft e. V.: Empfehlungen des 47. Deutschen Verkehrsgerichtstags. 28.-30. Januar 2009 in Goslar, S. 5.

³⁸⁷ Bundesverfassungsgericht: Hessische und schleswig-holsteinische Vorschriften zur automatisierten Erfassung von Kfz-Kennzeichen nichtig. Urteil vom 11. März 2008: 1 BvR 2074/05; 1 BvR 1254/07. Pressemitteilung Nr. 27/2008.

Der Schutz der Privatsphäre ist auch bei der I2C-Abstandswarnung bzw. kooperativen Systemen im Allgemeinen ein bisher nicht vollständig gelöstes Problem, siehe auch Kapitel 6.3.3.2. Solche Bedenken sind von einer öffentlichen Institution ernst zu nehmen und sie steht in der Pflicht, ihre Bürger vor einem Missbrauch ihrer Daten zu schützen.

6.3.2. Private Tunnelbetreiber und Fahrzeughersteller

Als privatwirtschaftliche Unternehmen müssen sowohl private Tunnelbetreiber als auch Fahrzeughersteller das wirtschaftliche Risiko, das mit den einzelnen Maßnahmen verbunden ist, eingehend bewerten. Für beide Gruppen von Belang sind dabei I2C-Abstandswarnung und Intelligent Speed Adaptation. Die beiden rein tunnelbezogenen Systeme tangieren die Fahrzeughersteller dagegen nicht. Es kann daher angenommen werden, dass sie diesen Systemen *indifferent* gegenüberstehen. Tabelle 43 zeigt das Ergebnis für die privaten Tunnelbetreiber. Das Moving Spot Light System ist als Prototypsystem mit einem relativ hohen Risiko und im Vergleich zu den beiden kooperativen Systemen mit deutlich höheren Kosten verbunden. Für Section Control sind die Kosten zwar ähnlich hoch, doch da das System bereits erfolgreich am Markt eingeführt wurde und seine Wirksamkeit bewiesen hat, ist das Risiko gering. Hieraus folgt eine *negative* bzw. *positive* Bewertung der beiden Tunnelsysteme.

Eine Einführung von Intelligent Speed Adaptation wäre mit einem geringen Risiko und geringen Kosten verbunden, und wird demnach *positiv* eingeschätzt. Für die I2C-Abstandswarnung ist das Risiko ebenfalls eher gering. Da die Kosten jedoch höher sind als für Intelligent Speed Adaptation, wird die Bewertung *indifferent* vergeben.

Tabelle 43: Ergebnis der Stakeholder-Analyse – Private Tunnelbetreiber

System	Bewertung aus Sicht der privaten Tunnelbetreiber
Moving Spot Light System	<i>negativ</i>
I2C-Abstandswarnung	<i>indifferent</i>
Section Control	<i>positiv</i>
Intelligent Speed Adaptation	<i>positiv</i>

Die Einschätzung aus Sicht der Fahrzeughersteller zeigt Tabelle 44. Moving Spot Light System und Section Control sind als rein infrastrukturbasierte Systeme *indifferent* anzusehen. Die I2C-Abstandswarnung ist mit einem hohen Risiko verbunden, da viele Fragen im Hinblick auf diese Technologie und die neuen Anwendungen derzeit noch nicht geklärt sind. Es herrscht jedoch in der Automobilindustrie ein allgemeiner Konsens darüber, dass diese Systeme einen sehr hohen positiven Einfluss auf die Verkehrssicherheit haben werden, wie die große Zahl an Forschungsprojekten zeigt. Aus diesem Grund erhält die I2C-Abstandswarnung trotz des hohen Risikos eine *positive* Wertung.

Für Intelligent Speed Adaptation ist die Wertung *negativ*, da das System zwar im Gegensatz zur I2C-Abstandswarnung das Prototypenstadium bereits hinter sich gelassen hat, die eingreifende Variante jedoch außerhalb der sog. SUNflower-Staaten (Schweden, United

Kingdom, Norwegen) und Australien auf große Vorbehalte stößt.³⁸⁸ Das Risiko des Scheiterns bei einer Markteinführung außerhalb dieser Staaten ist daher zu groß.

Tabelle 44: Ergebnis der Stakeholder-Analyse – Fahrzeughersteller

System	Bewertung aus Sicht der Fahrzeughersteller
Moving Spot Light System	<i>indifferent</i>
I2C-Abstandswarnung	<i>positiv</i>
Section Control	<i>indifferent</i>
Intelligent Speed Adaptation	<i>negativ</i>

6.3.3. Tunnelnutzer

Die Einschätzung der Systeme aus Sicht der Tunnelnutzer erfolgt für jedes System gesondert.

6.3.3.1. Moving Spot Light System

Die technische Machbarkeit des Moving Spot Light Systems wurde im Rahmen des Projekts SafeTunnel gezeigt.³⁸⁹ Da es sich dabei jedoch um ein System im Prototypenstadium handelt, gibt es keine Erfahrungswerte hinsichtlich Akzeptanz und Wirksamkeit. Gleichwohl wurde das System durch die Ben Gurion University, Israel, in einer Simulatorstudie untersucht.³⁹⁰ Die Ergebnisse dieser Studie dienen als Basis, um die Bewertung des Systems durch die Tunnelnutzer abzuschätzen.

Die Studie zeigt, dass die Probanden mit dem System sehr gut in der Lage waren, den geforderten Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug einzuhalten. Die Akzeptanz durch die Probanden war hoch und ihre mentale Beanspruchung war etwa gleich hoch wie die der Kontrollgruppe, die ohne System die Simulatorfahrt durchführte. Es ist davon auszugehen, dass ein solches System im Tunnel von den Nutzern akzeptiert würde, wobei es durch entsprechende Beschilderung im Vorfeld des Tunnels bzw. eine Informationskampagne ergänzt werden müsste, um die Tunnelnutzer über seine Funktion aufzuklären.

Die Kosten des Systems als Teil der Tunnelausstattung würden von den Betreibern des Tunnels getragen. In mautpflichtigen Tunneln würden sie vermutlich ganz oder teilweise auf die Nutzer umgelegt. In einem nicht-mautpflichtigen Tunnel müssten die Kosten aus den zur Verfügung stehenden (öffentlichen) Mitteln gedeckt werden. Die Einführung einer Maut in einem bislang kostenfrei nutzbaren Tunnel zur Einführung des Systems würde sehr wahrscheinlich keine Akzeptanz finden, da wie bereits erwähnt, die Bereitschaft,

³⁸⁸ SARTRE Consortium: European Drivers and Road Risk - Part 1: Report on Principle Analyses. 2004, S. 181. Befragt wurden die Probanden u.a. zu Systemen, die Fahren mit überhöhter Geschwindigkeit verhindern.

³⁸⁹ Sala, G.: The Control Center. Abschlusspräsentation der europäischen Projekte Safe Tunnel und SIR-TAKI im Rahmen des Forums Safety in Road and Rail Tunnels, 20.-21. Dezember 2004 in Turin.

³⁹⁰ Shinar, D.; Shacham, M.: Evaluation of Different Methods for Keeping a Safe Headway in a Tunnel. Safe Tunnel, 1st Workshop, 12. Dezember 2002 in Turin.

für zusätzliche Sicherheit im Tunnel zu zahlen, gering ist.³⁹¹ Insgesamt kann eine positive Einstellung der Tunnelnutzer angenommen werden.

6.3.3.2. I2C-Abstandswarnung

Die kommunikationsbasierte Abstandswarnung befindet sich derzeit ebenfalls noch im Prototypenstadium, so dass keine Erfahrungswerte in Bezug auf die Akzeptanz durch die Nutzer vorliegen. Entscheidend sind im Hinblick auf dieses System zum einen die Kosten, zum anderen das Thema Datenschutz und Datensicherheit. Die Kostenproblematik wurde in Kapitel 6.2.3 bereits ausführlich erläutert. Der Preis des zukünftigen Systems muss in angemessener Relation zur Zahlungsbereitschaft der Käufer stehen, um dem System zum Durchbruch zu verhelfen. Die im Rahmen der Kosten-Wirksamkeitsanalyse angenommenen 200 €/pro Pkw scheinen diese Bedingung zu erfüllen. Laufende Kosten für Services, z. B. ein monatlich fälliger Beitrag, wurden in der Analyse nicht berücksichtigt, da Studien zeigen, dass hierfür keine Zahlungsbereitschaft besteht.³⁹²

Die Datenschutzproblematik wurde im Rahmen des bereits erwähnten Projekts CVIS, *Cooperative Vehicle-Infrastructure Services* untersucht. 60 % der Befragten gaben in dieser Studie an, dass sie kooperative Fahrzeugsysteme nicht nutzen würden, wenn durch die Datenübertragung ihre Privatsphäre verletzt würde, siehe Abbildung 27.

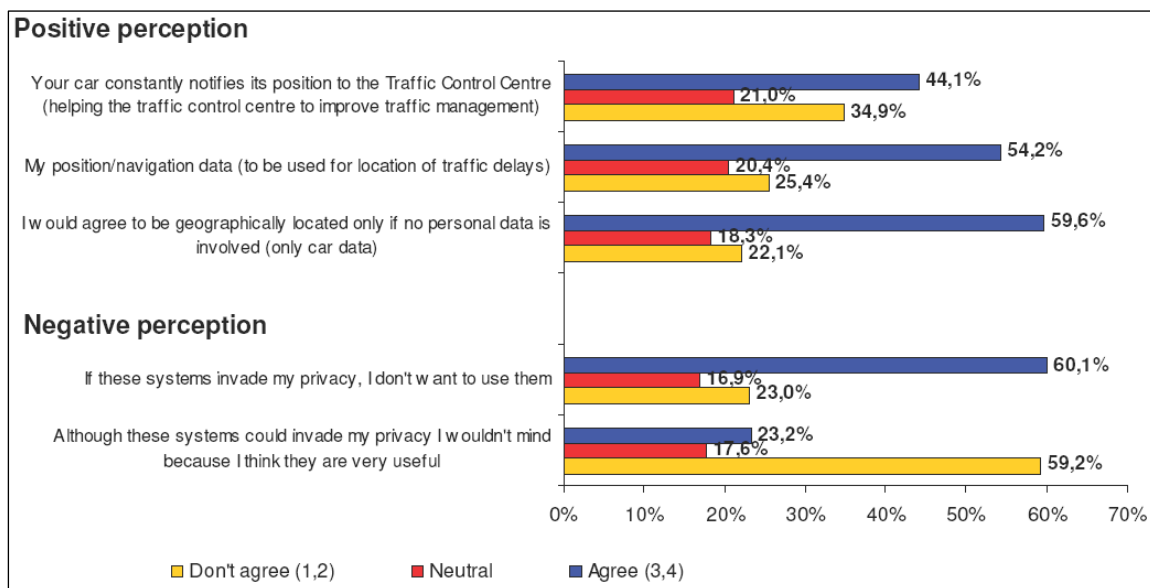


Abbildung 27: Datenschutzproblematik bei kooperativen Fahrzeugsystemen³⁹³

Dies bedeutet, dass sie einer geographischen Ortung nur dann zustimmen, wenn ausschließlich Fahrzeug- aber keine persönlichen Daten übertragen werden. Befragte aus Deutschland, der Schweiz und Österreich zeigten sich dabei besonders sensibel, während

³⁹¹ Oltersdorf, K.; Mayer, B.: Safe Tunnel: User Needs Analysis. 1st Workshop Preventive Safety in Road Tunnels, 12. Dezember 2002 in Orbassano, S. 15-16.

³⁹² Fuchs, S.; Bankosegger, D.; Sladek, O. et al.: COOPERS: Market and User Assessment. Deliverable D11-B-IR 2600/2700-2, 2007, S. 33.

³⁹³ RACC Automobile Club: CVIS: Stakeholder utility, data privacy and usability analysis and recommendations for operational guarantees and system safeguards: Europe. Deliverable D.DEPN.4.1, 2007, S. 28.

Personen aus Italien, den Niederlanden und Portugal weniger Angst vor Verletzungen der Privatsphäre haben.³⁹⁴

Für die Verbreitung von kooperativen Systemen ist die Frage des Datenschutzes bzw. der Datensicherheit von zentraler Bedeutung. Dabei geht es nicht nur um einen etwaigen nicht-autorisierten Zugriff durch Hacker, sondern auch um die zweckfremde Nutzung durch Behörden, die z. B. bei der Verfolgung von Verkehrsregelverstößen möglich wäre. Aufgrund dieser Vorbehalte und der momentan noch ungelösten Fragen in Bezug auf die Umsetzung eines sicheren Schutzes wird eine *negative* Bewertung angenommen.

6.3.3.3. Section Control

Begleitend zur Einführung von Section Control in einem Autobahntunnel auf der A13 in Overschie, Niederlande, wurde eine Befragung von Autofahrern durchgeführt. Die Akzeptanzrate des Systems war mit 75 % der Befragten sehr hoch, und sie gaben an, dass sie Section Control für sinnvoller hielten als die üblichen Radarfallen.³⁹⁵

Die grundsätzliche Akzeptanz von Maßnahmen zur Überwachung der Geschwindigkeit konnte in weiteren Projekten gezeigt werden. 73 % der Befragten in einer Studie des Österreichischen Kuratoriums für Verkehrssicherheit sagten, dass die Geschwindigkeit in Tunneln überwacht werden müsse, da sich viele Fahrer nicht an die Vorgaben hielten. Eine vermehrte Radarüberwachung wurde von 23 % befürwortet, 19 % forderten mehr Kontrollen und härtere Strafen, bis hin zum Verlust der Fahrerlaubnis.³⁹⁶

In der Studie des SARTRE-Konsortiums zur Einstellung der Europäer zum Straßenverkehr und Risiken im Straßenverkehr wurden die Probanden ebenfalls zum Thema Geschwindigkeitsüberschreitung befragt. Eine Mehrheit von 60 % der 24.007 Befragten sprach sich dabei für eine schärfere Bestrafung von Geschwindigkeitsdelikten aus.³⁹⁷ Auch das Bewusstsein, dass überhöhte Geschwindigkeit in vielen Fällen die Ursache eines Unfalls ist, war unter den Befragten weit verbreitet. 83,7 % sahen immer, sehr oft oder oft einen Zusammenhang.³⁹⁸ Aufgrund dieser Umfrageergebnisse ist davon auszugehen, dass Section Control auf breite Akzeptanz stoßen würde. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass die für das System unerlässliche Erfassung der Fahrzeugkennzeichen nicht für andere Zwecke missbraucht wird. Dies würde einen unzulässigen Eingriff in die informelle Selbstbestimmung darstellen und zum Verlust der Akzeptanz führen.

³⁹⁴ RACC Automobile Club: CVIS: Stakeholder utility, data privacy and usability analysis and recommendations for operational guarantees and system safeguards: Europe. Deliverable D.DEPN.4.1, 2007, S. 24-25.

³⁹⁵ Stefan, C.: Automatic Speed Enforcement on the A13 Motorway (NL). In: Bundesanstalt für Straßenwesen: ROSEBUD WP4 Final Report. Deliverable WP4, 2005. S. 44-52, S. 49.

³⁹⁶ Christ, R.; Smuc, M.; Gatscha, M.; Milanovic, M.: Analyse von Tunnelgestaltungselementen - Zusammenfassender Bericht aus Befragung und Befahrung. Kuratorium für Verkehrssicherheit, Institut für Verkehrspsychologie, Wien, 2002, S. 51.

³⁹⁷ „Penalties for speeding should be much more severe”, strongly agree: 27,4 %; agree: 33,1 %. SARTRE Consortium: European Drivers and Road Risk - Part 2: Report on In-depth Analyses. 2004, S. 88.

³⁹⁸ „How often do you think driving too fast is the cause of road accidents?” always: 10,4 %; very often: 41,8 %; often: 31,5 %. SARTRE Consortium: European Drivers and Road Risk - Part 2: Report on In-depth Analyses. 2004, S. 88.

Überlegungen zur Zahlungsbereitschaft sind nicht erforderlich, da die Kosten für Section Control zulasten des Tunnelbetreibers gehen, der sie, zumindest in Österreich, durch die Einnahmen aus Geschwindigkeitsdelikten zurückerhält.³⁹⁹

6.3.3.4. Intelligent Speed Adaptation

Der bislang größte Feldtest von Intelligent Speed Adaptation fand im schwedischen Lund statt. Insgesamt kamen 290 Fahrzeuge mit einem ISA-System zum Einsatz, die von mehr als 10.000 Probanden gefahren wurden. Auch in Lillehammer (Schweden) und Karmøy (Norwegen) wurden größere Probandenstudien durchgeführt.⁴⁰⁰

Je nach Studie sagten 60 bis 75 % der europäischen Probanden aus, dass sie ein solches System für sinnvoll erachten.⁴⁰¹ Auch außereuropäische Studien bestätigen eine hohe Akzeptanz durch die Probanden.^{402,403} In der bereits zitierten Befragung im Rahmen des SARTRE-Projekts gaben ca. 28 % der 24.007 Befragten an, *sehr* für die Einführung von Systemen zur Geschwindigkeitsbegrenzung zu sein und 33 % *ziemlich*.⁴⁰⁴ Aus diesen Durchschnittswerten geht allerdings nicht hervor, dass es deutliche Unterschiede zwischen den teilnehmenden Staaten gibt. Die Werte für ein System zur Geschwindigkeitsbegrenzung reichen von 14 % für *sehr zustimmend* in der Tschechischen Republik bis 51 % in Irland. Die Schweiz, Österreich und Deutschland befinden sich dabei mit 15 %, 16 % und 17 % am unteren Ende der Skala. Laut der SARTRE-Studie zeigen Fahrer aus diesen Staaten generell nur wenig Unterstützung für Systeme, die sie in irgendeiner Form in ihrem Verhalten einschränken. In anderen Staaten werden solche Systeme eher akzeptiert und als wünschenswert empfunden, z. B. in Irland, Frankreich und Großbritannien.⁴⁰⁵ Dies gilt jedoch nur für ISA-Varianten, die entweder nur eine warnende Funktion haben oder – wie hier angenommen – vom Fahrer übersteuert werden können.

³⁹⁹ Nach Österreichischer Gesetzgebung gehen 80 % der Einnahmen aus Geschwindigkeitsdelikten an den Betreiber der Infrastruktur, im Falle des Kaisermühlentunnels die staatliche Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs- Aktiengesellschaft (ASFINAG). Die restlichen 20 % werden durch das Österreichische Innenministerium für die Deckung der Betriebskosten verwendet. Siehe Stefan, C.: Section Control. Automatic Speed Enforcement in the Kaisermühlen Tunnel Vienna, A22 Motorway. In: Bundesanstalt für Straßenwesen: ROSEBUD WP4 Final Report. Deliverable WP4, 2005, S. 24-43, S. 39.

⁴⁰⁰ Grunnan, T.; Vaa, T.; Ulleberg, P. et al.: Implications of Innovative Technology for the Key Areas in Traffic Safety: Speed, Drink Driving and Restraint Systems. Deliverable 10, Final Report, 2008, S. 103-106.

⁴⁰¹ Goodwin, F.; Achterberg, F.; Beckmann, J.: Intelligent Speed Assistance - Myths and Reality. European Transport Safety Council Position on ISA. Brüssel, ohne Jahresangabe, S. 11.

⁴⁰² Young, K.; Regan, M.: Intelligent Speed Adaptation: A Review. Australasian Road Safety Research, Policing and Education Conference. Sydney, 2002, S. 445-450, S. 446.

⁴⁰³ Jamson, S.; Carsten, O.; Chorlton, K. et al.: Intelligent Speed Adaptation: Literature Review and Scoping Study. Deliverable ISA-TfL D1, 2006, S. 17-19.

⁴⁰⁴ „How much would you be in favour of the following: Speed limiting devices fitted to cars that prevented drivers exceeding the speed limit? Very: 27,8 %; fairly 32,6 %; not much 23,3 %, not at all 16,3 %. SARTRE Consortium: European Drivers and Road Risk - Part 2: Report on In-depth Analyses. 2004, S. 90. Ebenso in Oei, H.; Wiethoff, M.; Boverie, S. et al.: ADVISORS: Inventory of ADAS and User Needs. Update 2002. Deliverable 1.2 v12.3, 2002, S. 34.

⁴⁰⁵ SARTRE Consortium: European Drivers and Road Risk - Part 1: Report on Principle Analyses. 2004, S. 180-181. Befragt wurden die Probanden zu Systemen, die Fahren mit überhöhter Geschwindigkeit, unter Alkoholeinfluss und bei Müdigkeit verhindern.

Zwangsweise eingreifende Systeme, die sich weder abschalten noch übersteuern lassen, werden schlecht bewertet und führen bei Probanden zu erhöhter mentaler Beanspruchung, Stress und Unsicherheit.⁴⁰⁶

Da der Fokus dieser Arbeit auf der Schweiz, Österreich und Deutschland liegt, kann unter Berücksichtigung der Vorbehalte gegen intervenierende Systeme nicht von einer positiven Einstellung gegenüber Intelligent Speed Adaptation ausgegangen werden. Hinzu kommt, dass die abgeschätzten Kosten für die Pkw-Ausstattung mit 300 € pro Fahrzeug über der in mehreren Studien ermittelten Zahlungsbereitschaft von 55 bis 150 € liegen.⁴⁰⁷ Es ist daher insgesamt von einer *negativen* Bewertung auszugehen.

6.3.3.5. Zusammenfassung

Das Ergebnis der Stakeholder-Analyse aus Sicht der Tunnelnutzer zeigt Tabelle 45.

Tabelle 45: Ergebnis der Stakeholder-Analyse – Tunnelnutzer

System	Bewertung aus Sicht der Tunnelnutzer
Moving Spot Light System	<i>positiv</i>
I2C-Abstandswarnung	<i>negativ</i>
Section Control	<i>positiv</i>
Intelligent Speed Adaptation	<i>negativ</i>

⁴⁰⁶ Young, K.; Regan, M.: Intelligent Speed Adaptation: A Review. Australasian Road Safety Research, Policing and Education Conference. Sydney, 2002, S. 449.

⁴⁰⁷ Jamson, S.; Carsten, O.; Chorlton, K. et al.: Intelligent Speed Adaptation: Literature Review and Scoping Study. Deliverable ISA-TfL D1, 2006, S. 22-23.

6.4. Zusammenfassung der Stakeholder-Analyse

In die Zusammenfassung der Stakeholder-Analyse fließen in Bezug auf die Tunnelbetreiber die Bewertungen aus Sicht der privaten Tunnelbetreiber ein. Wie in Kapitel 6.3.1 geschildert, wird angenommen, dass die Einschätzung der Systeme durch die öffentlichen Tunnelbetreiber weitgehend der gesellschaftlichen Bewertung in der Kosten-Wirksamkeitsanalyse entspricht. Eine weitere Berücksichtigung der gesellschaftlichen Perspektive würde somit dem Ergebnis der Kosten-Wirksamkeitsanalyse in der Gesamtbewertung (siehe Kapitel 7) doppeltes Gewicht einräumen.

In Abbildung 28 ist die Zusammenfassung der Stakeholder-Analyse zu sehen. Sie zeigt ein heterogenes Bild, es gibt kaum Übereinstimmung zwischen den unterschiedlichen Stakeholdern.

Moving Spot Light System I2C-Abstandswarnung Section Control Intelligent Speed Adaptation	Tunnelbetreiber	Fahrzeughersteller	Nutzer
	Nutzer	Tunnelbetreiber	Fahrzeughersteller
		Fahrzeughersteller	Nutzer Tunnelbetreiber
	Fahrzeughersteller Nutzer		Tunnelbetreiber
	negativ	indifferent	positiv

Abbildung 28: Ergebnisse der Stakeholder-Analyse

Insbesondere Intelligent Speed Adaptation polarisiert. Während die Tunnelbetreiber das System positiv einschätzen, lehnen sowohl Fahrzeughersteller als auch Nutzer es ab. Demgegenüber steht Section Control, das von Nutzern und Tunnelbetreibern positiv bewertet wird und von den Fahrzeugherstellern indifferent, da sie von diesem System nicht betroffen sind. Für die beiden verbleibenden Systeme gibt es keine Übereinstimmung, sie werden von jedem Stakeholder anders beurteilt. Die insgesamt beste Bewertung erhält damit Section Control, das von keinem Stakeholder abgelehnt und von den beiden weiteren positiv bewertet wird.

7. Synthese von Kosten-Wirksamkeits- und Stakeholder-Analyse

Die sozio-ökonomische Analyse hat gezeigt, dass die rein infrastrukturbasierten Systeme ein günstigeres Kosten-Wirksamkeitsverhältnis haben als die kooperativen. Zur Erlangung eines Gesamtergebnisses erfolgt nun eine Synthese mit den Ergebnissen der Stakeholder-Analyse.

Anschaulich wird das Ergebnis der Stakeholder-Analyse, wenn man es in Form eines Netzdiagramms darstellt, siehe Abbildung 29. Dafür werden die Werte *positiv*, *indifferent* und *negativ* mit +1, 0 und -1 gleichgesetzt. Der negative Wert befindet sich im Zentrum des Netzes, der positive außen am Rand. Je mehr Punkte außen liegen bzw. je weiter außen sie liegen, umso positiver ist die Gesamtbewertung des Systems. Die jeweils zusammen dargestellten Systeme können so anhand der Größe der Fläche, die sich zwischen den drei Punkten bildet, miteinander verglichen werden. In Abbildung 29 sind das Netzdiagramm sowie die Werte des Kosten-Wirksamkeitsverhältnisses für *best guess*-, *best case*- und *worst case*-Szenario für den Auffahrunfall zu sehen.

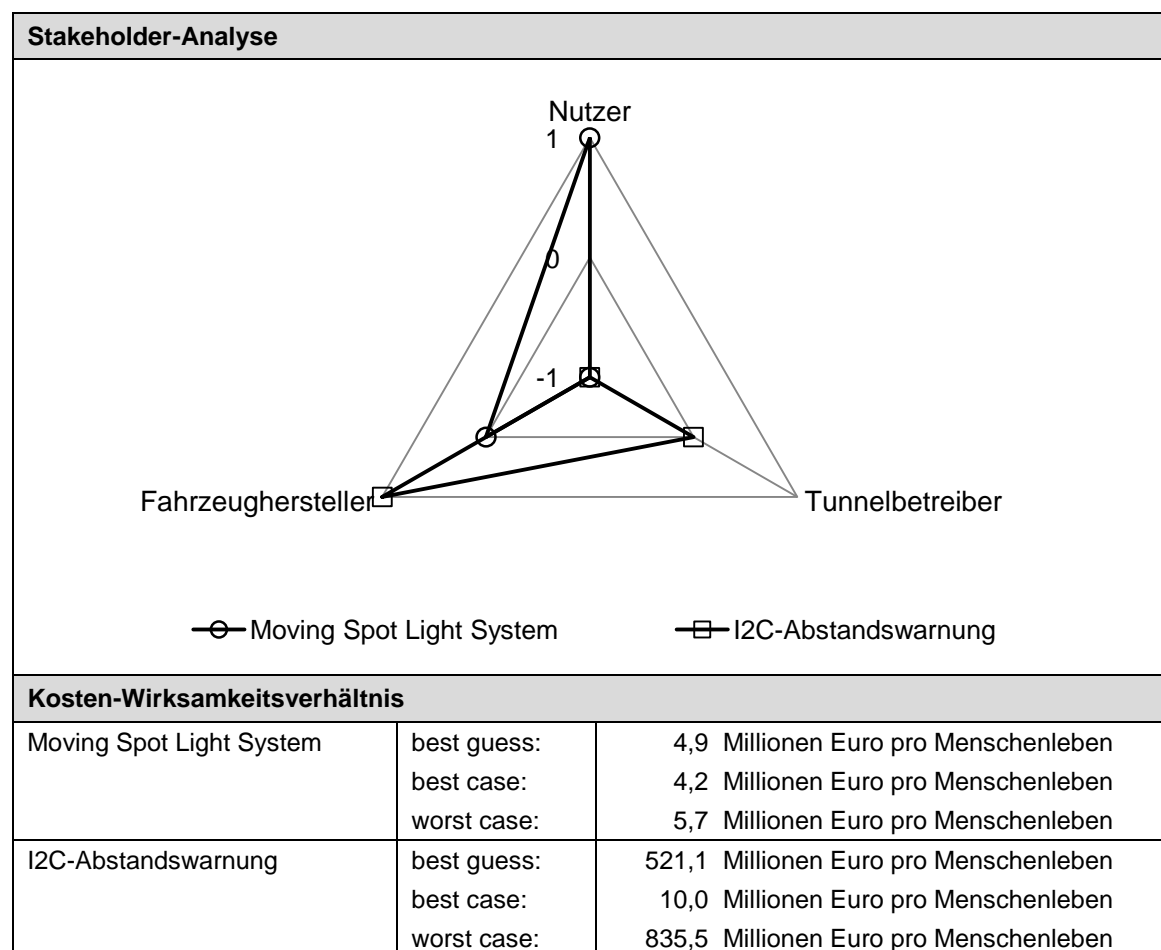


Abbildung 29: Gesamtergebnis in Bezug auf Auffahrunfälle

Die Flächen, die Moving Spot Light und I2C-Abstandswarnung im Netzdiagramm einnehmen, sind gleich groß, da sie jeweils eine positive, eine indifferente und eine negative

Wertung auf sich vereinen. Berücksichtigt man aber, dass die Nutzer als wichtigste Stakeholder-Gruppe identifiziert wurden, so ist das Moving Spot Light System gegenüber der I2C-Abstandswarnung im Vorteil. Dies ist ebenso der Fall, wenn man die Kosten-Wirksamkeitsverhältnisse miteinander vergleicht. Selbst im *best case*, für den eine sehr positive Entwicklung für Kosten und Marktdurchdringung angenommen wurde, ist das Kosten-Wirksamkeitsverhältnis der I2C-Abstandswarnung mehr als doppelt so hoch wie für das Moving Spot Light System. In der Gesamtbewertung ist daher das Moving Spot Light System zur Vermeidung von Auffahrunfällen vorzuziehen.

Das Gesamtergebnis in Bezug auf Alleinunfälle, das in Abbildung 30 zu sehen ist, spricht ebenfalls für die rein infrastrukturbasierte Lösung.

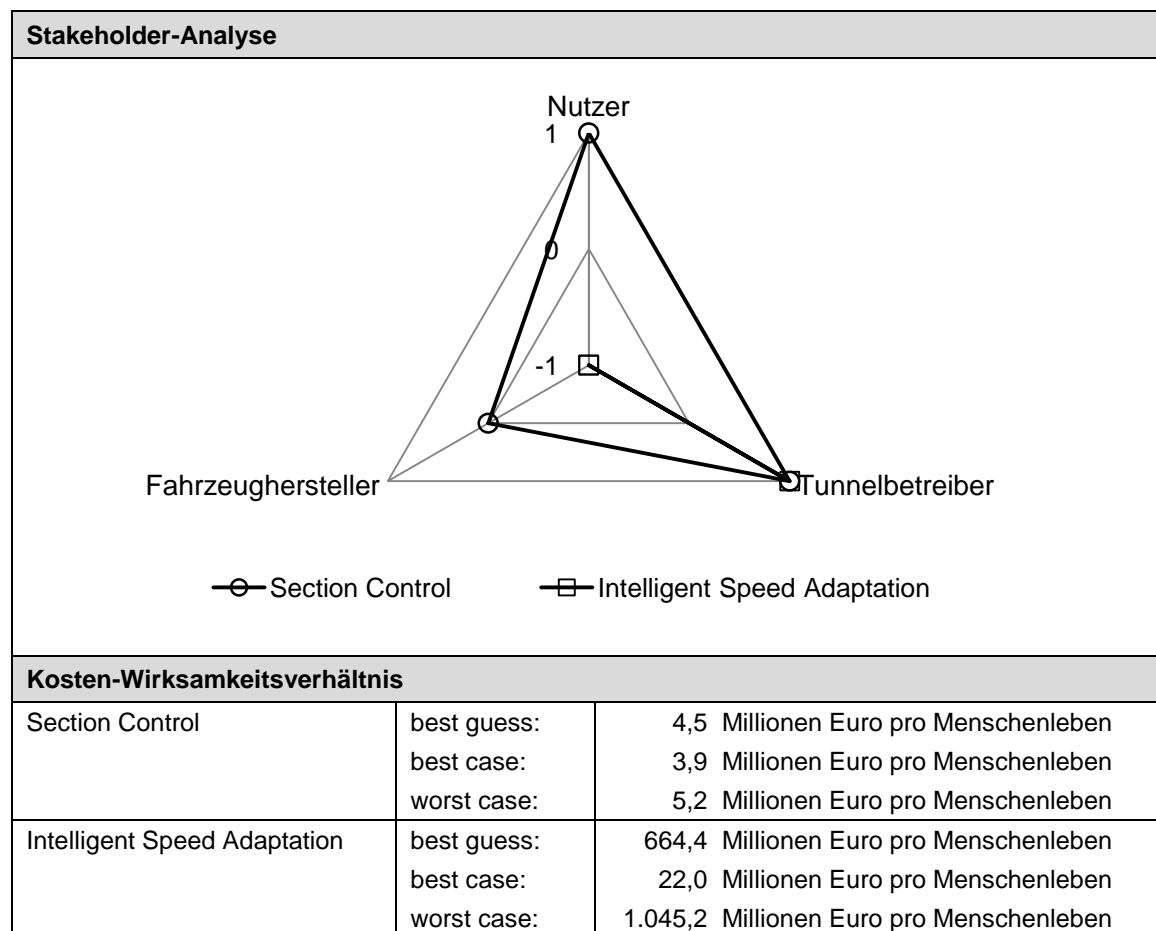


Abbildung 30: Gesamtergebnis in Bezug auf Alleinunfälle

Für Intelligent Speed Adaptation bildet sich aufgrund der beiden negativen Bewertungen durch Nutzer und Fahrzeughersteller keine Fläche, sondern nur eine Linie aus. Im Gegensatz dazu ist die Fläche von Section Control die größte aller vier betrachteten Systeme, da es sowohl von den Nutzern als auch den Tunnelbetreibern positiv eingeschätzt wird. Auch aus gesellschaftlicher Perspektive ist Section Control Intelligent Speed Adaptation vorzuziehen, da es ein deutlich günstigeres Kosten-Wirksamkeitsverhältnis aufweist. Selbst im *best case*-Szenario sind die Kosten pro Menschenleben für Intelligent Speed Adaptation mehr als fünf Mal so hoch wie für Section Control.

8. Fazit

Ausgangspunkt dieser Arbeit war die Annahme, dass ein Zusammenwirken von Infrastruktur- und Fahrzeugsystemen Synergien ermöglichen und die Verkehrssicherheit von Straßentunneln erhöhen würde. Zur Prüfung dieser Annahme wurde für vier ausgewählte Systeme eine Kosten-Wirksamkeitsanalyse durchgeführt und darin für zwei Unfalltypen je ein rein infrastrukturbasiertes und ein kooperatives System miteinander verglichen. Die Eingangsdaten für diese Analyse beruhen auf allgemein zugänglichen Veröffentlichungen wie z. B. offiziellen Statistiken und Projektberichten. Dabei war es, wie bei Fragestellungen dieser Art üblich,⁴⁰⁸ unumgänglich, einige Vereinfachungen und Abschätzungen zu treffen, die bei der Einordnung des Ergebnisses zu berücksichtigen sind.

Die weitreichendste Vereinfachung besteht darin, von einem unikausalen Zusammenhang zwischen Unfalltyp und Unfallursache auszugehen. Wie in Kapitel 4.1.2 geschildert, wird angenommen, dass Auffahrunfälle durch einen zu geringen Sicherheitsabstand und Alleinunfälle durch zu hohe Geschwindigkeit verursacht werden. Es ist unstrittig, dass diese Ursachen einen großen Einfluss auf diese Unfalltypen haben, doch in der Regel führt erst das Zusammenwirken mehrerer Ursachen zu einem Unfall. Dennoch ist eine Reduzierung auf eine Primärursache in Untersuchungen zur Wirkung von Sicherheitssystemen üblich, da die Berücksichtigung mehrerer Ursachen und ihrer Wechselwirkungen zu komplex ist. Die hier angenommene unikausale Verknüpfung der Unfallursache mit dem Unfalltyp stellt eine konservative Abschätzung des Wirkungspotentials dar, da z. B. eine zu hohe Geschwindigkeit auch bei anderen Unfalltypen als dem betrachteten Alleinunfall relevant ist, das Wirkungsfeld der betrachteten Systeme also größer ist als im Rahmen dieser Analyse berücksichtigt.

Zur Beurteilung der Systeme mussten eine Reihe von Daten ermittelt bzw. abgeschätzt werden. Soweit möglich wurden entsprechende Studien zurate gezogen und falls eigene Schätzungen erforderlich waren, so wurden sie gekennzeichnet. Nicht berücksichtigt wurden Betriebs- bzw. Wartungskosten der Systeme, da verlässliche Daten nicht vorlagen und Schätzungen mit einem zu großen Unsicherheitsfaktor verbunden gewesen wären.

Die Folge dieser Abschätzungen und Einschränkungen ist, dass die Ergebnisse der Kosten-Wirksamkeitsanalyse, dargestellt in Form der Kosten-Wirksamkeitsverhältnisse in Abbildung 29 und Abbildung 30, im Hinblick auf ihre absoluten Werte mit Vorbehalt zu betrachten sind. Für ein relatives Ranking der Systeme, wie es im Rahmen dieser Arbeit erfolgte, sind sie dagegen geeignet. Die Stabilität des Rankings wurde durch eine Sensitivitätsanalyse nachgewiesen.⁴⁰⁹

Die eingangs geäußerte Vermutung, dass der Einsatz kooperativer Systeme im Tunnel Synergien schaffen und für eine Erhöhung der Verkehrssicherheit sorgen könnte, hat sich für den betrachteten Zeitraum nicht bestätigt, da die beiden rein infrastrukturbasierten

⁴⁰⁸ Siehe z. B. Abele, J.; Kerlen, C.; Krüger, S. et al.: SEISS: Exploratory Study on the Potential Socio-economic Impact of the Introduction of Intelligent Safety Systems in Road Vehicles. Teltow, 2005, S. 20.

⁴⁰⁹ Relative Rankings aufgrund von Unsicherheiten kommen z. B. in Ahmed-Zaid, F.; Bai, F.; Basnayake, C. et al.: Vehicle Safety Communications - Applications (VSC-A). DOT HS 811 073. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, 2008, zum Einsatz, vgl. S. 47.

Systeme sowohl im Hinblick auf die Wirksamkeit als auch das Kosten-Wirksamkeitsverhältnis ein besseres Ergebnis erzielen. Als ausschlaggebend erweist sich die geringe Wahrscheinlichkeit, mit der ein ausgerüstetes Fahrzeug durch einen ausgerüsteten Tunnel fährt und somit der Systemnutzen zum Tragen kommt. Solange die Ausrüstungsrate der Tunnel und insbesondere der Fahrzeuge gering ist, kann keine relevante Nutzensausprägung entstehen, was sich negativ auf das Kosten-Wirksamkeitsverhältnis auswirkt.

Ob ein Kosten-Wirksamkeitsverhältnis von 3,9 Millionen Euro pro Menschenleben oder 1 Milliarde Euro pro Menschenleben angemessen ist, lässt sich an dieser Stelle nicht beantworten, dies kann nur durch einen gesellschaftlichen Konsens geschehen. Wie in Kapitel 5.1 geschildert, gibt es unterschiedliche Ansätze zur Ermittlung des Werts eines Menschenlebens, doch die in Tabelle 17 (siehe S. 53) aufgelisteten Kostensätze für Getötete und Verletzte lassen vermuten, dass drei- oder vierstellige Millionenbeträge als zu hoch angesehen werden. Nicht zu vergessen ist dabei allerdings, dass im Falle der kooperativen Systeme der überwiegende Teil der Kosten von den Pkw-Käufern zu tragen wäre, wodurch sich die Summe auf viele Betroffenen verteilt. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass bei den Pkw-Käufern die nötige Bereitschaft vorhanden ist, in Sicherheitssysteme und insbesondere kooperative Sicherheitssysteme zu investieren. Die Stakeholder-Analyse hat jedoch gezeigt, dass die durchschnittliche Zahlungsbereitschaft für derartige Systeme relativ gering ist und zudem Vorbehalte in Bezug auf die Zuverlässigkeit elektronischer Systeme sowie den Schutz persönlicher Daten bestehen. Basis der Stakeholder-Analyse für die Pkw-Käufer bzw. Tunnel-Nutzer waren im wesentlichen Quellen zu europäischen Projekten, in denen jeweils sehr viele Pkw-Fahrer aus allen Staaten der EU befragt wurden. Sie geben damit eine Querschnittsmeinung wieder und sind aufgrund der großen Zahl an Probanden als sehr vertrauenswürdig einzustufen. Dies ist insbesondere deshalb von Bedeutung, da die Pkw-Käufer in Zusammenhang mit kooperativen Systemen die wichtigste Stakeholder-Gruppe darstellen.

In Bezug auf die Unfallvermeidung in Straßentunneln lautet das Fazit dieser Arbeit, dass kooperative Systeme im Betrachtungszeitraum nicht von Relevanz sein werden. Ein Ausbau tunnelspezifischer, infrastrukturbasierter Systeme und Maßnahmen verspricht eine größere und schneller verfügbare Sicherheitswirkung. Berührungspunkte zwischen Tunnelbetreibern und Fahrzeugherstellern bzw. ihren Zulieferern gibt es wenige und die kooperativen Systeme werden aller Voraussicht nach unabhängig von diesem speziellen Anwendungsfall entwickelt und eingeführt werden. Sollte sich mittel- bis langfristig zeigen, dass kooperativen Systemen der Durchbruch gelingt, so besteht die Möglichkeit, Tunnel entsprechend nachzurüsten, was, wie in Kapitel 5.3 geschildert, mit verhältnismäßig geringen Kosten verbunden wäre.

9. Ausblick

Was ist Risiko und wann ist ein Risiko inakzeptabel hoch und erfordert Gegenmaßnahmen? Der erste Teil der Frage ist leicht zu beantworten: Risiko ist nach allgemeiner Definition das Produkt aus den unerwünschten Folgen eines Ereignisses und der Wahrscheinlichkeit seines Eintretens. Eine Antwort auf den zweiten Teil der Frage zu finden, ist ungleich schwieriger, da sie nicht vollständig objektiv gegeben werden kann, sondern von subjektiven Eindrücken und Wertungen abhängt. Dies zeigt sich bspw. daran, dass die Möglichkeit eines Flugzeugabsturzes bei vielen Menschen Angst auslöst und einige dazu bringt, das Fliegen zu vermeiden. Bei objektiver Betrachtung der Fakten sollten diese Menschen nicht am Straßenverkehr teilnehmen, da dort die Gefahr ums Leben zu kommen weit größer ist.⁴¹⁰

Schwere Unfälle in Straßentunneln sind ebenfalls seltene Ereignisse, doch im Vergleich mit Unfällen auf freier Strecke mit einer höheren Sterbewahrscheinlichkeit verbunden. Die Eintretenswahrscheinlichkeit ist somit gering, doch die möglichen Konsequenzen so schwerwiegend, dass das Risiko als zu hoch empfunden wird. Diese Einschätzung spiegelt sich in der Vielzahl an Forschungsprojekten zum Thema Tunnelsicherheit wider.

Während viele der dargestellten Projekte an der Verminderung der unerwünschten Folgen ansetzen, indem sie z. B. die Branddetektion im Tunnel optimieren, haben die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Systeme die Unfallvermeidung und damit die Verringerung der Eintrittswahrscheinlichkeit des Risikos zum Ziel. Im Allgemeinen ist ein präventiver einem folgenmindernden Ansatz vorzuziehen, da er das Übel gewissermaßen bei der Wurzel packt. Unfallvermeidende Fahrzeug- und Tunnelsysteme sollten daher stärker in den Fokus der Tunnelsicherheitsforschung gestellt werden. Kooperative Systeme sind dabei jedoch nicht die erste Wahl, wie die Analysen ergeben haben. Da sich diese Systeme derzeit noch in der Entwicklung befinden, sollte in einigen Jahren aber eine erneute Bewertung der Situation unter Berücksichtigung des dann erreichten Stands der Technik erfolgen. Zukünftige Forschung könnte sich dann zudem auf eine breitere Datenbasis in Bezug auf das Unfallgeschehen in Straßentunneln stützen, da in Artikel 15 Absatz 1 der EU-Richtlinie zur Sicherheit in Straßentunneln die Weiterleitung von Berichten über Unfälle und Brände in Tunneln an die EU-Kommission vorgeschrieben wird.⁴¹¹

Was die zukünftige Entwicklung der kooperativen Sicherheitssysteme angeht, so sind derzeit noch eine Reihe von Fragen offen, z. B. in Bezug auf standardisierte Protokolle, Schnittstellen und Datenschutz. Neben diesen technischen Aspekten ist fraglich, ob sich eine ausreichend hohe Nachfrage nach diesen Systemen einstellen wird. Diese Nachfrage

⁴¹⁰ Im Jahr 2008 starben weltweit 502 Menschen bei Flugzeugabstürzen, während im gleichen Zeitraum allein in Deutschland 4.477 Menschen bei Unfällen im Straßenverkehr ums Leben kamen. Siehe Adler, S.: Wie sicher ist Fliegen? http://flugzeuge-flugzeugtechnik.suite101.de/article.cfm/wie_sicher_ist_fliegen, abgerufen am 10. April 2010; bzw. Statistisches Bundesamt: Verkehrsunfälle 2008. <http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Statistiken/Verkehr/Verkehrsunfaelle/Tabellen/Content75/UnfaelleVerunglueckte,templateId=renderPrint.psml>, abgerufen am 10. April 2010.

⁴¹¹ N. N.: Richtlinie 2004/54/EG des europäischen Parlaments und des Rates über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz. In: Amtsblatt der Europäischen Union vom 30. April 2004. S. 56.

stellt sich nur dann ein, wenn die Systeme durch die Nutzer akzeptiert werden, doch Kundenbedürfnisse und mögliche Markteinführungsstrategien werden in technisch orientierten Forschungsprojekten häufig als zweitrangig angesehen.⁴¹² Die Folge davon ist, dass die Entwicklung von kooperativen Sicherheitssystemen bzw. Fahrerassistenzsystemen im Allgemeinen bisher überwiegend durch die Technologie getrieben wird (technology push) und nur in geringem Maße durch eine originäre Nachfrage der Endkunden (demand pull). Durchsetzungskraft erhält eine Innovation aber nur dann, wenn sie vom Konsumenten angenommen und verstanden wird. Unbedingt zu berücksichtigen ist daher bei der Entwicklung, dass sich Entwickler und Endkunde in ihrer Sicht auf das gleiche Produkt in der Regel deutlich unterscheiden.⁴¹³ Innovative Technologie ist kein Wert an sich für den durchschnittlichen Autokäufer, die im Fahrzeug verbaute Technologie stellt für ihn immer weniger ein kaufentscheidendes Kriterium dar und seine Bereitschaft, über hohe Verkaufspreise die Forschungs- und Entwicklungskosten neuartiger Systeme zu zahlen, nimmt ab.⁴¹⁴ Zwar nennt die Mehrheit der Autofahrer Sicherheit als wichtigstes Kriterium eines Fahrzeugs, doch es wird wenig hinterfragt, was mit „Sicherheit“ genau gemeint ist und welche Erwartungen mit Sicherheitssystemen verbunden sind. Umfragen zu diesem Thema zeigen, dass ein durchschnittlicher Autofahrer über Sicherheitssysteme nicht diskutieren oder sich im Detail mit ihnen auseinandersetzen will.⁴¹⁵ Nicht technische Details kooperativer Systeme werden daher die Endkunden überzeugen, sondern intuitiv begreifbare Mensch-Maschine-Schnittstellen, ein verlässliches Datenschutzkonzept⁴¹⁶ und nicht zuletzt die Überzeugung, einen echten Mehrwert für einen angemessenen Preis zu erhalten.

Wie eine erfolgversprechende Markteinführungsstrategie für kooperative Systeme aussehen könnte, kann an dieser Stelle nicht im Detail erläutert werden.⁴¹⁷ In einer Reihe von Quellen zu Forschungsprojekten auf diesem Gebiet wird jedoch die These vertreten, dass mit der Markteinführung ein ganzes Bündel von Anwendungen zur Verfügung stehen muss, um die Anschaffung einer On Board Unit für den Endnutzer lohnenswert zu machen, darunter z. B. mobile Internetanwendungen.⁴¹⁸ Die Ausrüstungsrate von Fahrzeugen bzw. der Infrastruktur ist bei diesen Systemen essentiell, so dass einige Anwendung nicht oder nur eingeschränkt funktionieren werden, solange die Verbreitung gering ist.

⁴¹² Abele, J.; Kerlen, C.; Krüger, S. et al.: SEISS: Exploratory Study on the Potential Socio-economic Impact of the Introduction of Intelligent Safety Systems in Road Vehicles. Teltow, 2005, S. 19.

⁴¹³ Spiegel, U.; Chytka, H.: Die Automobilbranche. Produktinnovationen am Kunden entwickeln. In: Naderer, G.; Chytka, H. (Hrsg.): Qualitative Marktforschung in Theorie und Praxis. Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Gabler, 2007, S. 571-581. S. 580.

⁴¹⁴ PricewaterhouseCoopers Automotive Institute: Zukunft in Bewegung. Die Automobilindustrie im Spannungsfeld zwischen neuen Chancen und alten Strukturen. Hannover/Stuttgart, 2010, S. 75 bzw. S. 102.

⁴¹⁵ Spiegel Institut Mannheim: Sicherheitssysteme Deutschland. Studie im Auftrag der Robert Bosch GmbH. http://www.spiegel-institut.de/files/si_sicherheitssysteme.pdf, abgerufen am 18. Oktober 2009.

⁴¹⁶ DMR Consulting: REACT: Sensing Traffic Together. An Industry Survey on REACT System Potential Impact. DMR Consulting, 2005, S. 4.

⁴¹⁷ Siehe z. B. Schlich, C.: Fahrerassistenzsysteme. Marktpenetrationsstrategien auf der Basis von Nutzwertanalysen. VDM Verlag Dr. Müller, Saarbrücken, 2009; oder Großklaus, R.: Neue Produkte einführen: Von der Idee zum Markterfolg. Gabler, Wiesbaden, 2008.

⁴¹⁸ Siehe z. B. National Highway Traffic Safety Administration: Vehicle Safety Communications Project Task 3 Final Report. Identify Intelligent Vehicle Safety Applications Enabled by DSRC. DOT HS 809 859. 2006, S. 139.

Die Nutzung des Internets im Fahrzeug könnte in dieser Phase die Markteinführung unterstützen.⁴¹⁹ Dienste wie z. B. verbesserte Verkehrs- oder Routeninformationen (points of interest) sind in diesem Zusammenhang ebenfalls denkbar. Im Falle eines solchen Applikationsbündels könnte u. a. die Kommunikation mit standardisierter Tunnelinfrastruktur vorgesehen werden, so dass die im Rahmen dieser Arbeit beschriebenen Systeme als Teil der Gesamtstrategie eingeführt werden könnten.

⁴¹⁹ Car 2 Car Communication Consortium: Manifesto. Overview of the C2C-CC System. http://www.car-to-car.org/fileadmin/downloads/C2C-CC_manifesto_v1.1.pdf, abgerufen am 9. Januar 2010, S. 20.

Anhang

A1. Allgemeine Eingangsdaten

A1.1. Datenbasis Tunnel

Basis der Unfallanalyse von Robatsch/Nussbaumer sind die in Tabelle I aufgeführten Tunnel. Es handelt sich um 99 Tunnel im Bereich von Autobahnen und Schnellstraßen, die eine Nettolänge von 169 km haben. Berücksichtigt man, dass diese 99 Tunnel aus insgesamt 154 Röhren bestehen, ergibt sich eine Gesamtlänge von 221 km.

Tabelle I: Liste der berücksichtigten Tunnel⁴²⁰

Straße	Nummer	Name	Länge in km	Anzahl Röhren	Länge aller Röhren in km
B	178	Achberg	1,498	1	1,498
A	14	Amberg	2,977	1	2,977
S	16	Arlberg	14,071	1	14,071
A	2	Assingberg	0,249	1	0,249
B	145	Bartlkreuz	1,090	1	1,090
A	13	Bergisel	0,484	2	0,968
A	9	Bosruck	5,600	1	5,600
A	10	Brentenberg	0,596	2	1,192
B	169	Brettfall	1,360	1	1,360
S	6	Bruck	1,228	2	2,456
A	14D	City	1,311	1	1,311
S	16	Dalaas	1,811	1	1,811
A	2	Donnersberg	0,862	2	1,724
A	2	Ehrentalerberg	3,345	2	6,690
A	2	Falkenberg	1,170	2	2,340
A	13	Galerie Schönberg I-III	0,885	2	1,770
S	6	Ganzstein	2,135	1	2,135
B	188	Geistal-Vergröss	0,775	1	0,775
A	9	Gleinalm	8,430	1	8,430
S	16	Gondebach, Gal., Flirsch	1,475	1	1,475
B	188	Gortniel	0,559	1	0,559
A	2	Gräbern	2,147	1	2,147
S	6	Grasberg	0,386	2	0,772
A	9	Gratkorn Nord	0,675	2	1,350
A	9	Gratkorn Süd	0,800	2	1,600
A	2	Großliedl	0,427	2	0,854

⁴²⁰ Robatsch, K.; Nussbaumer, C.: Sicherheitsvergleich von Tunnels - Verkehrssicherheitsvergleich von Tunnels mit Gegenverkehr und Tunnels mit Richtungsverkehr mit anderen Straßenarten. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg.): Schriftenreihe Straßenforschung Heft 552, Wien, 2005, S. 37-39.

Straße	Nummer	Name	Länge in km	Anzahl Röhren	Länge aller Röhren in km
A	2	Grünbrücke Trettnig	0,450	2	0,900
S	16	Gurnau	0,362	2	0,724
A	2	Haberberg	0,406	2	0,812
B	193	Hahnenköpfe, Faschinagalerie	0,240	1	0,240
A	10	Helbersberg	0,809	2	1,618
A	2	Herzogberg	2,003	1	2,003
A	10	Hiefler	1,990	2	3,980
A	23	Hirschstetten	0,500	2	1,000
A	22	Kaisermühlen	2,115	2	4,230
A	2	Kalcherkogel	1,962	2	3,924
B	116	Kapfenberg, Schloßberg	0,325	1	0,325
A	11	Karawanken	4,414	1	4,414
A	10	Katschberg	6,439	1	6,439
B	167	Klamm	1,598	1	1,598
S	6	Krieglach	0,275	2	0,550
A	10	Kroislerwand	0,680	2	1,360
A	9	Kurztunnel	0,237	1	0,237
A	23	Laaberg	0,290	2	0,580
A	9	Lainberg (PY 67)	2,278	1	2,278
S	16	Langen	2,278	2	4,556
B	178	Lärchberg	1,823	1	1,823
B	179	Lermoos	3,500	1	3,500
S	16	Malfonbach	0,369	2	0,738
S	6	Massenberg	0,426	2	0,852
B	188	Mathon Ost	0,946	1	0,946
B	188	Maurentobel	0,231	1	0,231
B	311	Mauth	0,210	1	0,210
A	12	Mils	1,604	2	3,208
A	2	Mitterberg	1,131	2	2,262
A	12	Mötz-Schlenzmure	0,237	2	0,474
A	12	Mötz-Simmering	0,867	2	1,734
B	179	Nassereith Unterflurtrasse	0,872	1	0,872
S	6	Niklasdorf	1,232	2	2,464
B	78	Obdach Umfahrung	0,800	1	0,800
S	6	Oberaich	0,211	2	0,422
A	10	Ofenauer	1,388	2	2,776
A	10	Oswaldiberg	4,307	2	8,614
B	197	Passür	1,814	1	1,814
S	16	Perjen	2,993	1	2,993
A	14	Pfänder	6,718	1	6,718
S	16	Pianner, Quadratscher	1,535	2	3,070

Straße	Nummer	Name	Länge in km	Anzahl Röhren	Länge aller Röhren in km
A	9	Plabutsch	9,919	1	9,919
A	9	Pretallerkogel	0,535	2	1,070
B	171	Rattenberg	0,622	1	0,622
A	10	Reit	0,400	2	0,800
A	12	Roppen	5,096	1	5,096
A	9	Rottenmann	0,400	2	0,800
A	9	Schartnerkogel	1,249	2	2,498
B	311	Schmitten	5,100	1	5,100
B	311	Schwarzach-Schönberg	2,988	1	2,988
B	188	Schweizermals	0,847	1	0,847
B	179	Seecktunnel	0,481	1	0,481
A	9	Selzthal	1,012	2	2,024
A	10	St. Andrä	0,470	2	0,940
A	2	St. Kollmann	0,625	2	1,250
S	6	St. Ruprecht	0,611	2	1,222
A	23	Stadlauer	0,465	2	0,930
S	6	Tanzenberg	2,384	2	4,768
A	10	Tauern	6,397	1	6,397
B	311	Trattenbach	0,419	1	0,419
A	2	Übelskogel	0,360	2	0,720
A	9	Überdeckung Hebersberg	0,247	2	0,494
B	169	Unterberg	0,494	1	0,494
A	11	Unterf. St. Niklas	0,700	2	1,400
A	2	Unterflurtrasse Lendorf	0,800	2	1,600
B	70	Voitsberg Umfahrung	1,300	1	1,300
A	9	Wald	2,888	2	5,776
A	9	Wartberg I	0,525	2	1,050
A	9	Wartberg II	0,205	2	0,410
A	9	Wartberg III	0,255	2	0,510
A	12	Wilten	0,435	2	0,870
A	10	Wolfsberg	0,800	2	1,600
A	10	Zetzenberg	0,550	2	1,100

A1.2. Entwicklung des Pkw-Bestands in Österreich

Die folgende Tabelle II zeigt die Entwicklung des Pkw-Bestands in Österreich von 2004 bis 2008. In diesem Zeitraum betrug der Anteil der Neuzulassungen pro Jahr 7% des Pkw-Bestands. Als Schätzwert für 2009 dient daher der Bestand von 2008 * 107%.

Tabelle II: Pkw-Bestand in Österreich 2004-2008^{421,422}

	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Bestand	4.109.000	4.157.000	4.205.000	4.246.000	4.285.000	4.584.950
Neuzulassungen	311.000	308.000	309.000	298.000	294.000	
Ant. der Neuzulassungen am Bestand	7,6%	7,4%	7,3%	7,0%	6,9%	

⁴²¹ Statistik Austria: Kfz-Bestand in Österreich 2004 bis 2008.

http://www.statistik.at/web_de/statistiken/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge_-_bestand/020727.html, abgerufen am 5. Januar 2010.

⁴²² Statistik Austria: Kfz-Neuzulassungen in Österreich 2004 bis 2008.

http://www.statistik.at/web_de/statistiken/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge_-_neuzulassungen/020728.html, abgerufen am 5. Januar 2010.

A2. Eingangsdaten *best guess*-Szenario

A2.1. Geschätzte Entwicklung der Ausstattung mit I2C-Abstandswarnung *BEST GUESS*

Tabelle III: Geschätzte Entwicklung der Ausstattung mit I2C-Abstandswarnung,
best guess-Szenario

Jahr	Pkw-Bestand	Neuwagen pro Jahr (7 % Wachstum)	Anteil Neuwagen mit System in %	Anteil ausgerüstete Pkw am Bestand pro Jahr in %	Anzahl ausgerüstete Pkw pro Jahr	Anteil ausgerüstete Pkw am Bestand kumuliert in %	Anzahl ausgerüstete Pkw kumuliert
2009	4.584.950	320.947	0%	0,00%	0	0,0%	0
2010	4.905.897	343.413	0%	0,00%	0	0,0%	0
2011	5.249.309	367.452	0%	0,00%	0	0,0%	0
2012	5.616.761	393.173	0%	0,00%	0	0,0%	0
2013	6.009.934	420.695	0%	0,00%	0	0,0%	0
2014	6.430.630	450.144	5%	0,35%	22.507	0,4%	22.507
2015	6.880.774	481.654	10%	0,70%	48.165	1,0%	70.673
2016	7.362.428	515.370	15%	1,05%	77.305	2,0%	147.978
2017	7.877.798	551.446	20%	1,40%	110.289	3,3%	258.267
2018	8.429.244	590.047	25%	1,75%	147.512	4,8%	405.779

A2.2. Geschätzte Entwicklung der Ausstattung mit Intelligent Speed Adaptation

BEST GUESS

Tabelle IV: Geschätzte Entwicklung der Ausstattung mit Intelligent Speed Adaptation, *best guess*-Szenario

Jahr	Pkw-Bestand	Neuwagen pro Jahr (7 % Wachstum)	Anteil Neuwagen mit System in %	Anteil ausgerüstete Pkw am Bestand pro Jahr in %	Anzahl ausgerüstete Pkw pro Jahr	Anteil ausgerüstete Pkw am Bestand kumuliert in %	Anzahl ausgerüstete Pkw kumuliert
2009	4.584.950	320.947	0%	0,00%	0	0,0%	0
2010	4.905.897	343.413	1%	0,07%	3.434	0,1%	3.434
2011	5.249.309	367.452	5%	0,35%	18.373	0,4%	21.807
2012	5.616.761	393.173	10%	0,70%	39.317	1,1%	61.124
2013	6.009.934	420.695	15%	1,05%	63.104	2,1%	124.228
2014	6.430.630	450.144	20%	1,40%	90.029	3,3%	214.257
2015	6.880.774	481.654	25%	1,75%	120.414	4,9%	334.671
2016	7.362.428	515.370	30%	2,10%	154.611	6,6%	489.282
2017	7.877.798	551.446	35%	2,45%	193.006	8,7%	682.288
2018	8.429.244	590.047	40%	2,80%	236.019	10,9%	918.307

A2.3. Kosten und Wirksamkeit Moving Spot Light System

BEST GUESS

Wirkungsfeld: Auffahrunfälle
 Wirkungspotential: 64%
 Investitionskosten Tunnel: 520.000 Euro pro Tunnel-km, Rückgang um 10% in 10 Jahren
 Investitionskosten Pkw: 0

Tabelle V: Kosten und Wirksamkeit Moving Spot Light System, best guess-Szenario

Jahr	Anteil ausgerüstete Tunnel kumuliert	Neuausrüstung pro Jahr	Getötete im Ohne-Fall	Vermeidung Getötete im Mit-Fall	Vermeidung in Abhängigkeit von der Ausrüstungsrate	jährliche Investitionskosten Tunnel	jährliche Investitionskosten Pkw
2009	0%	0%	6	3,8	0,00	0 €	0 €
2010	1%	1%	6	3,8	0,04	1.136.431 €	0 €
2011	2%	1%	6	3,8	0,08	1.123.662 €	0 €
2012	3%	1%	6	3,8	0,12	1.110.893 €	0 €
2013	5%	2%	6	3,8	0,19	2.196.249 €	0 €
2014	8%	3%	6	3,8	0,31	3.256.067 €	0 €
2015	11%	3%	6	3,8	0,42	3.217.760 €	0 €
2016	14%	3%	6	3,8	0,54	3.179.453 €	0 €
2017	17%	3%	6	3,8	0,65	3.141.147 €	0 €
2018	20%	3%	6	3,8	0,77	3.102.840 €	0 €
					Summe = 3,12	Summe = 21.464.502 €	Summe = 0 €

A2.4. Kosten und Wirksamkeit I2C-Abstandswarnung

BEST GUESS

Wirkungsfeld: Auffahrunfälle

Wirkungspotential: 60%

Investitionskosten Tunnel: 11.000 Euro pro Tunnel-km, Rückgang um 10% in 10 Jahren

Investitionskosten Pkw: 200 Euro pro Pkw, Rückgang um 30% in 10 Jahren (ab Einführung)

Tabelle VI: Kosten und Wirksamkeit I2C-Abstandswarnung, best guess-Szenario

Jahr	Anteil ausgerüstete Tunnel kumuliert	Neuausrüstung pro Jahr	Anteil ausgerüstete Pkw pro Jahr	Verbundene Ausrüstungsrate von Tunnel und Pkw	Getötete im Ohne-Fall	Vermeidung Getötete im Mit-Fall	Vermeidung in Abhängigkeit von der Ausrüstungsrate	jährliche Investitionskosten Tunnel	jährliche Investitionskosten Pkw
2009	0,0%	0,0%	0,00%	0,00%	6	3,6	0,00	0 €	0 €
2010	2,5%	2,5%	0,00%	0,00%	6	3,6	0,00	60.100 €	0 €
2011	5,0%	2,5%	0,00%	0,00%	6	3,6	0,00	59.424 €	0 €
2012	7,5%	2,5%	0,00%	0,00%	6	3,6	0,00	58.749 €	0 €
2013	10,0%	2,5%	0,00%	0,00%	6	3,6	0,00	58.074 €	0 €
2014	13,0%	3,0%	0,35%	0,05%	6	3,6	0,00	68.878 €	4.351.393 €
2015	16,0%	3,0%	1,03%	0,16%	6	3,6	0,01	68.068 €	8.990.878 €
2016	19,0%	3,0%	2,01%	0,38%	6	3,6	0,01	67.258 €	13.914.989 €
2017	22,0%	3,0%	3,28%	0,72%	6	3,6	0,03	66.447 €	19.116.789 €
2018	25,0%	3,0%	4,81%	1,20%	6	3,6	0,04	65.637 €	24.585.294 €
							Summe = 0,09	Summe = 572.636 €	Summe = 70.959.342 €

A2.5. Kosten und Wirksamkeit Section Control

BEST GUESS

Wirkungsfeld: Alleinunfälle
 Wirkungspotential: 65%
 Investitionskosten Tunnel: 600.000 Euro pro Tunnel-Röhre, Rückgang um 10% in 10 Jahren
 Investitionskosten Pkw: 0

Tabelle VII: Kosten und Wirksamkeit Section Control, best guess-Szenario

Jahr	Anteil ausgerüstete Tunnel kumuliert	Neuausrüstung pro Jahr	Getötete im Ohne-Fall	Vermeidung Getötete im Mit-Fall	Vermeidung in Abhängigkeit von der Ausrüstungsrate	jährliche Investitionskosten Tunnel	jährliche Investitionskosten Pkw
2009	2%	0	4	2,6	0,05	0 €	0 €
2010	4%	2%	4	2,6	0,10	1.827.467 €	0 €
2011	6%	2%	4	2,6	0,16	1.806.933 €	0 €
2012	8%	2%	4	2,6	0,21	1.786.400 €	0 €
2013	10%	2%	4	2,6	0,26	1.765.867 €	0 €
2014	13%	3%	4	2,6	0,34	2.618.000 €	0 €
2015	16%	3%	4	2,6	0,42	2.587.200 €	0 €
2016	19%	3%	4	2,6	0,49	2.556.400 €	0 €
2017	22%	3%	4	2,6	0,57	2.525.600 €	0 €
2018	25%	3%	4	2,6	0,65	2.494.800 €	0 €
					Summe = 3,25	Summe = 19.968.667 €	Summe = 0 €

A2.6. Kosten und Wirksamkeit Intelligent Speed Adaptation

BEST GUESS

Wirkungsfeld: Alleinunfälle
 Wirkungspotential: 76%
 Investitionskosten Tunnel: 1.000 Euro pro Tunnel-km, Rückgang um 10% in 10 Jahren
 Investitionskosten Pkw: 300 Euro pro Pkw, Rückgang um 30% in 10 Jahren

Tabelle VIII: Kosten und Wirksamkeit Intelligent Speed Adaptation, *best guess*-Szenario

Jahr	Anteil ausgerüstete Tunnel kumuliert	Neuausrüstung pro Jahr	Anteil ausgerüstete Pkw pro Jahr	Verbundene Ausstattungsrate von Tunnel und Pkw	Getötete im <i>Ohne-Fall</i>	Vermeidung Getötete im <i>Mit-Fall</i>	Vermeidung in Abhängigkeit von der Ausrüstungsrate	jährliche Investitionskosten Tunnel	jährliche Investitionskosten Pkw
2009	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4	3,04	0,00	0 €	0 €
2010	2,5%	2,5%	0,1%	0,0%	4	3,04	0,00	5.464 €	995.897 €
2011	5,0%	2,5%	0,4%	0,0%	4	3,04	0,00	5.402 €	5.144.323 €
2012	7,5%	2,5%	1,1%	0,1%	4	3,04	0,00	5.341 €	10.615.678 €
2013	10,0%	2,5%	2,1%	0,2%	4	3,04	0,01	5.279 €	16.407.120 €
2014	13,0%	3,0%	3,3%	0,4%	4	3,04	0,01	6.262 €	22.507.203 €
2015	16,0%	3,0%	4,9%	0,8%	4	3,04	0,02	6.188 €	28.899.249 €
2016	19,0%	3,0%	6,6%	1,3%	4	3,04	0,04	6.114 €	35.560.526 €
2017	22,0%	3,0%	8,7%	1,9%	4	3,04	0,06	6.041 €	42.461.330 €
2018	25,0%	3,0%	10,9%	2,7%	4	3,04	0,08	5.967 €	49.563.952 €
							Summe = 0,22	Summe = 52.058 €	Summe = 212.155.279 €

A3. Eingangsdaten *best case*-Szenario

A3.1. Geschätzte Entwicklung der Ausstattung mit I2C-Abstandswarnung

BEST CASE

Veränderung im Vergleich mit *best guess*-Szenario: 100% aller Neuwagen ab 2015

Tabelle IX: Geschätzte Entwicklung der Ausstattung mit I2C-Abstandswarnung, *best case*-Szenario

Jahr	Pkw-Bestand	Neuwagen pro Jahr (7 % Wachstum)	Anteil Neuwagen mit System in %	Anteil ausgerüstete Pkw am Bestand pro Jahr in %	Anzahl ausgerüstete Pkw pro Jahr	Anteil ausgerüstete Pkw am Bestand kumuliert in %	Anzahl ausgerüstete Pkw kumuliert
2009	4.584.950	320.947	0%	0,00%	0	0,0%	0
2010	4.905.897	343.413	0%	0,00%	0	0,0%	0
2011	5.249.309	367.452	0%	0,00%	0	0,0%	0
2012	5.616.761	393.173	0%	0,00%	0	0,0%	0
2013	6.009.934	420.695	0%	0,00%	0	0,0%	0
2014	6.430.630	450.144	5%	0,35%	22.507	0,4%	22.507
2015	6.880.774	481.654	100%	7,00%	481.654	7,3%	504.161
2016	7.362.428	515.370	100%	7,00%	515.370	13,8%	1.019.531
2017	7.877.798	551.446	100%	7,00%	551.446	19,9%	1.570.977
2018	8.429.244	590.047	100%	7,00%	590.047	25,6%	2.161.024

A3.2. Geschätzte Entwicklung der Ausstattung mit Intelligent Speed Adaptation

BEST CASE

Veränderung im Vergleich mit *best guess*-Szenario: 100% aller Neuwagen ab 2012

Tabelle X: Geschätzte Entwicklung der Ausstattung mit Intelligent Speed Adaptation, best case-Szenario

Jahr	Pkw-Bestand	Neuwagen pro Jahr (7 % Wachstum)	Anteil Neuwagen mit System in %	Anteil ausgerüstete Pkw m Bestand pro Jahr in %	Anzahl ausgerüstete Pkw pro Jahr	Anteil ausgerüstete Pkw am Bestand kumuliert in %	Anzahl ausgerüstete Pkw kumuliert
2009	4.584.950	320.947	0%	0,00%	0	0,0%	0
2010	4.905.897	343.413	1%	0,07%	3.434	0,1%	3.434
2011	5.249.309	367.452	5%	0,35%	18.373	0,4%	21.807
2012	5.616.761	393.173	100%	7,00%	393.173	7,4%	414.980
2013	6.009.934	420.695	100%	7,00%	420.695	13,9%	835.675
2014	6.430.630	450.144	100%	7,00%	450.144	20,0%	1.285.819
2015	6.880.774	481.654	100%	7,00%	481.654	25,7%	1.767.474
2016	7.362.428	515.370	100%	7,00%	515.370	31,0%	2.282.844
2017	7.877.798	551.446	100%	7,00%	551.446	36,0%	2.834.289
2018	8.429.244	590.047	100%	7,00%	590.047	40,6%	3.424.336

A3.3. Kosten und Wirksamkeit Moving Spot Light System

BEST CASE

Wirkungsfeld: Auffahrunfälle
 Wirkungspotential: 70%
 Investitionskosten Tunnel: 520.000 Euro pro Tunnel-km
 Investitionskosten Pkw: 0

Vergleich mit *best guess*-Szenario:

Wirkungspotential: 10% höher
 Investitionskosten Tunnel: Kostenrückgang um 20% statt 10% in 10 Jahren, Ausrüstungsrate um 25% höher

Tabelle XI: Kosten und Wirksamkeit Moving Spot Light System, best case-Szenario

Jahr	Anteil ausgerüstete Tunnel kumuliert	Neuausrüstung pro Jahr	Getötete im <i>Ohne-Fall</i>	Vermeidung Getötete im <i>Mit-Fall</i>	Vermeidung in Abhängigkeit von der Ausrüstungsrate	jährliche Investitionskosten Tunnel	jährliche Investitionskosten Pkw
2009	0%	0%	6	4,2	0,00	0 €	0 €
2010	1%	1%	6	4,2	0,05	1.404.578 €	0 €
2011	3%	1%	6	4,2	0,11	1.372.656 €	0 €
2012	4%	1%	6	4,2	0,16	1.340.733 €	0 €
2013	6%	3%	6	4,2	0,26	2.617.622 €	0 €
2014	10%	4%	6	4,2	0,42	3.830.667 €	0 €
2015	14%	4%	6	4,2	0,58	3.734.900 €	0 €
2016	18%	4%	6	4,2	0,74	3.639.133 €	0 €
2017	21%	4%	6	4,2	0,89	3.543.367 €	0 €
2018	25%	4%	6	4,2	1,05	3.447.600 €	0 €
					Summe = 4,26	Summe = 24.931.256 €	Summe = 0 €

A3.4. Kosten und Wirksamkeit I2C-Abstandswarnung

BEST CASE

Wirkungsfeld:	Auffahrunfälle
Wirkungspotential:	66%
Investitionskosten Tunnel:	11.000 Euro pro Tunnel-km
Investitionskosten Pkw:	200 Euro pro Pkw

Vergleich mit *best guess*-Szenario:

Wirkungspotential:	10% höher
Investitionskosten Tunnel:	Kostenrückgang um 20% statt 10% in 10 Jahren, Ausrüstungsrate um 25% höher
Investitionskosten Pkw:	Kostenrückgang um 60% statt 30% in 10 Jahren (ab Einführung), Ausrüstung von 100% aller Neuwagen ab 2015

Tabelle XII: Kosten und Wirksamkeit I2C-Abstandswarnung, *best case*-Szenario

Jahr	Anteil ausgerüstete Tunnel kumuliert	Neuausrüstung pro Jahr	Anteil ausgerüstete Pkw pro Jahr	Verbundene Ausrüstungsrate von Tunnel und Pkw	Getötete im Ohne-Fall	Vermeidung Getötete im Mit-Fall	Vermeidung in Abhängigkeit von der Ausrüstungsrate	jährliche Investitionskosten Tunnel	jährliche Investitionskosten Pkw
2009	0,0%	0,0%	0,00%	0,00%	6	3,96	0,00	0 €	0 €
2010	3,1%	3,1%	0,00%	0,00%	6	3,96	0,00	74.281 €	0 €
2011	6,3%	3,1%	0,00%	0,00%	6	3,96	0,00	72.592 €	0 €
2012	9,4%	3,1%	0,00%	0,00%	6	3,96	0,00	70.904 €	0 €
2013	12,5%	3,1%	0,00%	0,00%	6	3,96	0,00	69.216 €	0 €
2014	16,3%	3,8%	0,35%	0,06%	6	3,96	0,00	81.033 €	4.201.345 €
2015	20,0%	3,8%	100,00%	20,00%	6	3,96	0,79	79.008 €	8.348.672 €
2016	23,8%	3,8%	100,00%	23,75%	6	3,96	0,94	76.982 €	12.368.879 €
2017	27,5%	3,8%	100,00%	27,50%	6	3,96	1,09	74.956 €	16.175.745 €
2018	31,3%	3,8%	100,00%	31,25%	6	3,96	1,24	72.930 €	19.668.235 €
							Summe = 4,06	Summe = 671.901 €	Summe = 60.762.875 €

A3.5. Kosten und Wirksamkeit Section Control

BEST CASE

Wirkungsfeld: Alleinunfälle
 Wirkungspotential: 72%
 Investitionskosten Tunnel: 600.000 Euro pro Tunnel-Röhre
 Investitionskosten Pkw: 0

Vergleich mit *best guess*-Szenario:

Wirkungspotential: 10% höher
 Investitionskosten Tunnel: Kostenrückgang um 20% statt 10% in 10 Jahren, Ausrüstungsrate um 25% höher

Tabelle XIII: Kosten und Wirksamkeit Section Control, *best case*-Szenario

Jahr	Anteil ausgerüstete Tunnel kumuliert	Neuausrüstung pro Jahr	Getötete im <i>Ohne-Fall</i>	Vermeidung Getötete im <i>Mit-Fall</i>	Vermeidung in Abhängigkeit von der Ausrüstungsrate	jährliche Investitionskosten Tunnel	jährliche Investitionskosten Pkw
2009	3%	0	4	2,88	0,07	0 €	0 €
2010	5%	3%	4	2,88	0,14	2.258.667 €	0 €
2011	8%	3%	4	2,88	0,22	2.207.333 €	0 €
2012	10%	3%	4	2,88	0,29	2.156.000 €	0 €
2013	13%	3%	4	2,88	0,36	2.104.667 €	0 €
2014	16%	4%	4	2,88	0,47	3.080.000 €	0 €
2015	20%	4%	4	2,88	0,58	3.003.000 €	0 €
2016	24%	4%	4	2,88	0,68	2.926.000 €	0 €
2017	28%	4%	4	2,88	0,79	2.849.000 €	0 €
2018	31%	4%	4	2,88	0,90	2.772.000 €	0 €
					Summe = 4,50	Summe = 23.356.667 €	Summe = 0 €

A3.6. Kosten und Wirksamkeit Intelligent Speed Adaptation

BEST CASE

Wirkungsfeld:	Alleinunfälle
Wirkungspotential:	84%
Investitionskosten Tunnel:	1.000 Euro pro Tunnel-km
Investitionskosten Pkw:	300 Euro pro Pkw

Vergleich mit *best guess*-Szenario:

Wirkungspotential:	10% höher
Investitionskosten Tunnel:	Kostenrückgang um 20% statt 10% in 10 Jahren, Ausrüstungsrate um 25% höher
Investitionskosten Pkw:	Kostenrückgang um 60% statt 30% in 10 Jahren, Ausrüstung von 100% aller Neuwagen ab 2012

Tabelle XIV: Kosten und Wirksamkeit Intelligent Speed Adaptation, *best case*-Szenario

Jahr	Anteil ausgerüstete Tunnel kumuliert	Neuausrüstung pro Jahr	Anteil ausgerüstete Pkw pro Jahr	Verbundene Ausrüstungsrate von Tunnel und Pkw	Getötete im <i>Ohne-Fall</i>	Vermeidung Getötete im <i>Mit-Fall</i>	Vermeidung in Abhängigkeit von der Ausrüstungsrate	jährliche Investitionskosten Tunnel	jährliche Investitionskosten Pkw
2009	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4	3,36	0,00	0 €	0 €
2010	3,1%	3,1%	0,1%	0,0%	4	3,36	0,00	6.753 €	961.556 €
2011	6,3%	3,1%	0,4%	0,0%	4	3,36	0,00	6.599 €	4.776.871 €
2012	9,4%	3,1%	100,0%	9,4%	4	3,36	0,32	6.446 €	9.436.158 €
2013	12,5%	3,1%	100,0%	12,5%	4	3,36	0,42	6.292 €	13.882.948 €
2014	16,3%	3,8%	100,0%	16,3%	4	3,36	0,55	7.367 €	18.005.763 €
2015	20,0%	3,8%	100,0%	20,0%	4	3,36	0,67	7.183 €	21.674.437 €
2016	23,8%	3,8%	100,0%	23,8%	4	3,36	0,80	6.998 €	24.737.757 €
2017	27,5%	3,8%	100,0%	27,5%	4	3,36	0,92	6.814 €	27.020.846 €
2018	31,3%	3,8%	100,0%	31,3%	4	3,36	1,05	6.630 €	28.322.258 €
							Summe = 4,73	Summe = 61.082 €	Summe = 148.818.595 €

A3.7. Barwerte der Systeme im *best case*

Tabelle XV: Barwerte Moving Spot Light System und Section Control, *best case*

System	Jahr	Periode	Nutzen	Investitionskosten Tunnel pro Jahr	Barwert bezogen auf 2009
Moving Spot Light System	2009	1	0,00	0 €	0 €
	2010	2	0,05	1.404.578 €	1.273.993 €
	2011	3	0,11	1.372.656 €	1.185.751 €
	2012	4	0,16	1.340.733 €	1.103.025 €
	2013	5	0,26	2.617.622 €	2.050.976 €
	2014	6	0,42	3.830.667 €	2.858.502 €
	2015	7	0,58	3.734.900 €	2.654.324 €
	2016	8	0,74	3.639.133 €	2.463.109 €
	2017	9	0,89	3.543.367 €	2.284.086 €
	2018	10	1,05	3.447.600 €	2.116.527 €
	Summen:		4,26	24.931.256 €	17.990.293 €
Section Control	2009	1	0,07	0 €	0 €
	2010	2	0,14	2.258.667 €	2.048.677 €
	2011	3	0,22	2.207.333 €	1.906.778 €
	2012	4	0,29	2.156.000 €	1.773.747 €
	2013	5	0,36	2.104.667 €	1.649.061 €
	2014	6	0,47	3.080.000 €	2.298.343 €
	2015	7	0,58	3.003.000 €	2.134.176 €
	2016	8	0,68	2.926.000 €	1.980.432 €
	2017	9	0,79	2.849.000 €	1.836.491 €
	2018	10	0,90	2.772.000 €	1.701.768 €
	Summen:		4,50	23.356.667 €	17.329.472 €

Tabelle XVI: Barwerte I2C-Abstandswarnung und Intelligent Speed Adaptation, *best case*

System	Jahr	Periode	Nutzen	Investitionskosten Tunnel pro Jahr	Investitionskosten Pkw pro Jahr	Summe der Investitions- kosten pro Jahr	Barwert bezogen auf 2009
I2C-Abstands- warnung	2009	1	0,00	0 €	0 €	0 €	0 €
	2010	2	0,00	74.281 €	0 €	74.281 €	67.375 €
	2011	3	0,00	72.592 €	0 €	72.592 €	62.708 €
	2012	4	0,00	70.904 €	0 €	70.904 €	58.333 €
	2013	5	0,00	69.216 €	0 €	69.216 €	54.233 €
	2014	6	0,00	81.033 €	4.201.345 €	4.282.378 €	3.195.576 €
	2015	7	0,79	79.008 €	8.348.672 €	8.427.680 €	5.989.394 €
	2016	8	0,94	76.982 €	12.368.879 €	12.445.860 €	8.423.848 €
	2017	9	1,09	74.956 €	16.175.745 €	16.250.700 €	10.475.346 €
	2018	10	1,24	72.930 €	19.668.235 €	19.741.165 €	12.119.363 €
	Summen:		4,06	671.901 €	60.762.875 €	61.434.776 €	40.446.177 €
Intelligent Speed Adaptation	2009	1	0,00	0 €	0 €	0 €	0 €
	2010	2	0,00	6.753 €	961.556 €	968.308 €	878.284 €
	2011	3	0,00	6.599 €	4.776.871 €	4.783.471 €	4.132.142 €
	2012	4	0,32	6.446 €	9.436.158 €	9.442.604 €	7.768.454 €
	2013	5	0,42	6.292 €	13.882.948 €	13.889.240 €	10.882.583 €
	2014	6	0,55	7.367 €	18.005.763 €	18.013.129 €	13.441.675 €
	2015	7	0,67	7.183 €	21.674.437 €	21.681.619 €	15.408.722 €
	2016	8	0,80	6.998 €	24.737.757 €	24.744.756 €	16.748.225 €
	2017	9	0,92	6.814 €	27.020.846 €	27.027.660 €	17.422.271 €
	2018	10	1,05	6.630 €	28.322.258 €	28.328.888 €	17.391.480 €
	Summen:		4,73	61.082 €	148.818.595 €	148.879.677 €	104.073.835 €

A4. Eingangsdaten *worst case*-Szenario

A4.1. Geschätzte Entwicklung der Ausstattung mit I2C-Abstandswarnung

WORST CASE

Veränderung im Vergleich mit *best guess*-Szenario: Ausstattung entwickelt sich um 10% langsamer

Tabelle XVII: Geschätzte Entwicklung der Ausstattung mit I2C-Abstandswarnung, *worst case*-Szenario

Jahr	Pkw-Bestand	Neuwagen pro Jahr (7 % Wachstum)	Anteil Neuwagen mit System in %	Anteil ausgerüstete Pkw am Bestand pro Jahr in %	Anzahl ausgerüstete Pkw pro Jahr	Anteil ausgerüstete Pkw am Bestand kumuliert in %	Anzahl ausgerüstete Pkw kumuliert
2009	4.584.950	320.947	0%	0,00%	0	0,0%	0
2010	4.905.897	343.413	0%	0,00%	0	0,0%	0
2011	5.249.309	367.452	0%	0,00%	0	0,0%	0
2012	5.616.761	393.173	0%	0,00%	0	0,0%	0
2013	6.009.934	420.695	0%	0,00%	0	0,0%	0
2014	6.430.630	450.144	5%	0,32%	20.256	0,3%	20.256
2015	6.880.774	481.654	9%	0,63%	43.349	0,9%	63.605
2016	7.362.428	515.370	14%	0,95%	69.575	1,8%	133.180
2017	7.877.798	551.446	18%	1,26%	99.260	3,0%	232.441
2018	8.429.244	590.047	23%	1,58%	132.761	4,3%	365.201

A4.2. Geschätzte Entwicklung der Ausstattung mit Intelligent Speed Adaptation

WORST CASE

Veränderung im Vergleich mit *best guess*-Szenario: Ausstattung entwickelt sich um 10% langsamer

Tabelle XVIII: Geschätzte Entwicklung der Ausstattung mit Intelligent Speed Adaptation, worst case-Szenario

Jahr	Pkw-Bestand	Neuwagen pro Jahr (7 % Wachstum)	Anteil Neuwagen mit System in %	Anteil ausgerüstete Pkw am Bestand pro Jahr in %	Anzahl ausgerüstete Pkw pro Jahr	Anteil ausgerüstete Pkw am Bestand kumuliert in %	Anzahl ausgerüstete Pkw kumuliert
2009	4.584.950	320.947	0%	0,00%	0	0,0%	0
2010	4.905.897	343.413	1%	0,06%	3.091	0,1%	3.091
2011	5.249.309	367.452	5%	0,32%	16.535	0,4%	19.626
2012	5.616.761	393.173	9%	0,63%	35.386	1,0%	55.012
2013	6.009.934	420.695	14%	0,95%	56.794	1,9%	111.806
2014	6.430.630	450.144	18%	1,26%	81.026	3,0%	192.831
2015	6.880.774	481.654	23%	1,58%	108.372	4,4%	301.204
2016	7.362.428	515.370	27%	1,89%	139.150	6,0%	440.354
2017	7.877.798	551.446	32%	2,21%	173.705	7,8%	614.059
2018	8.429.244	590.047	36%	2,52%	212.417	9,8%	826.476

A4.3. Kosten und Wirksamkeit Moving Spot Light System

WORST CASE

Wirkungsfeld: Auffahrunfälle
 Wirkungspotential: 58%
 Investitionskosten Tunnel: 520.000 Euro pro Tunnel-km
 Investitionskosten Pkw: 0

Vergleich mit *best guess*-Szenario:

Wirkungspotential: 10% niedriger
 Investitionskosten Tunnel: Kostenrückgang um 5% statt 10% in 10 Jahren, Ausrüstungsrate um 10% geringer

Tabelle XIX: Kosten und Wirksamkeit Moving Spot Light System, *worst case*-Szenario

Jahr	Anteil ausgerüstete Tunnel kumuliert	Neuausrüstung pro Jahr	Getötete im <i>Ohne-Fall</i>	Vermeidung Getötete im <i>Mit-Fall</i>	Vermeidung in Abhängigkeit von der Ausrüstungsrate	jährliche Investitions-kosten Tunnel	jährliche Investitionskosten Pkw
2009	0%	0%	6	3,5	0,00	0 €	0 €
2010	1%	1%	6	3,5	0,03	1.028.534 €	0 €
2011	2%	1%	6	3,5	0,06	1.022.788 €	0 €
2012	3%	1%	6	3,5	0,09	1.017.042 €	0 €
2013	5%	2%	6	3,5	0,16	2.022.592 €	0 €
2014	7%	3%	6	3,5	0,25	3.016.650 €	0 €
2015	10%	3%	6	3,5	0,34	2.999.412 €	0 €
2016	13%	3%	6	3,5	0,44	2.982.174 €	0 €
2017	15%	3%	6	3,5	0,53	2.964.936 €	0 €
2018	18%	3%	6	3,5	0,63	2.947.698 €	0 €
					Summe = 2,53	Summe = 20.001.826 €	Summe = 0 €

A4.4. Kosten und Wirksamkeit I2C-Abstandswarnung

WORST CASE

Wirkungsfeld: Auffahrunfälle
 Wirkungspotential: 54%
 Investitionskosten Tunnel: 11.000 Euro pro Tunnel-km
 Investitionskosten Pkw: 200 Euro pro Pkw

Vergleich mit *best guess*-Szenario:

Wirkungspotential: 10% niedriger
 Investitionskosten Tunnel: Kostenrückgang um 5% statt 10% in 10 Jahren, Ausrüstungsrate um 10% geringer
 Investitionskosten Pkw: Kostenrückgang um 15% statt 30% in 10 Jahren (ab Einführung), Ausrüstungsrate um 10% geringer

Tabelle XX: Kosten und Wirksamkeit I2C-Abstandswarnung, *worst case*-Szenario

Jahr	Anteil ausgerüstete Tunnel kumuliert	Neuausrüstung pro Jahr	Anteil ausgerüstete Pkw pro Jahr	Verbundene Ausrüstungsrate von Tunnel und Pkw	Getötete im <i>Ohne-Fall</i>	Vermeidung Getötete im <i>Mit-Fall</i>	Vermeidung in Abhängigkeit von der Ausrüstungsrate	jährliche Investitionskosten Tunnel	jährliche Investitionskosten Pkw
2009	0,0%	0,0%	0,00%	0,00%	6	3,24	0,00	0 €	0 €
2010	2,3%	2,3%	0,00%	0,00%	6	3,24	0,00	54.394 €	0 €
2011	4,5%	2,3%	0,00%	0,00%	6	3,24	0,00	54.090 €	0 €
2012	6,8%	2,3%	0,00%	0,00%	6	3,24	0,00	53.786 €	0 €
2013	9,0%	2,3%	0,00%	0,00%	6	3,24	0,00	53.482 €	0 €
2014	11,7%	2,7%	0,32%	0,04%	6	3,24	0,00	63.814 €	4.426.417 €
2015	14,4%	2,7%	0,92%	0,13%	6	3,24	0,00	63.449 €	9.311.980 €
2016	17,1%	2,7%	1,81%	0,31%	6	3,24	0,01	63.084 €	14.688.043 €
2017	19,8%	2,7%	2,95%	0,58%	6	3,24	0,02	62.720 €	20.587.311 €
2018	22,5%	2,7%	4,33%	0,97%	6	3,24	0,03	62.355 €	27.043.823 €
							Summe = 0,06	Summe = 531.174 €	Summe = 76.057.575 €

A4.5. Kosten und Wirksamkeit Section Control

WORST CASE

Wirkungsfeld: Alleinunfälle
 Wirkungspotential: 59%
 Investitionskosten Tunnel: 600.000 Euro pro Tunnel-Röhre
 Investitionskosten Pkw: 0

Vergleich mit *best guess*-Szenario:

Wirkungspotential: 10% niedriger
 Investitionskosten Tunnel: Kostenrückgang um 5% statt 10% in 10 Jahren, Ausrüstungsrate um 10% geringer

Tabelle XXI: Kosten und Wirksamkeit Section Control, worst case-Szenario

Jahr	Anteil ausgerüstete Tunnel kumuliert	Neuausrüstung pro Jahr	Getötete im Ohne-Fall	Vermeidung Getötete im Mit-Fall	Vermeidung in Abhängigkeit von der Ausrüstungsrate	jährliche Investitionskosten Tunnel	jährliche Investitionskosten Pkw
2009	2%	0	4	2,36	0,04	0 €	0 €
2010	4%	2%	4	2,36	0,08	1.653.960 €	0 €
2011	5%	2%	4	2,36	0,13	1.644.720 €	0 €
2012	7%	2%	4	2,36	0,17	1.635.480 €	0 €
2013	9%	2%	4	2,36	0,21	1.626.240 €	0 €
2014	12%	3%	4	2,36	0,28	2.425.500 €	0 €
2015	14%	3%	4	2,36	0,34	2.411.640 €	0 €
2016	17%	3%	4	2,36	0,40	2.397.780 €	0 €
2017	20%	3%	4	2,36	0,47	2.383.920 €	0 €
2018	23%	3%	4	2,36	0,53	2.370.060 €	0 €
					Summe = 2,65	Summe = 18.549.300 €	Summe = 0 €

A4.6. Kosten und Wirksamkeit Intelligent Speed Adaptation

WORST CASE

Wirkungsfeld: Alleinunfälle
 Wirkungspotential: 84%
 Investitionskosten Tunnel: 1.000 Euro pro Tunnel-km
 Investitionskosten Pkw: 300 Euro pro Pkw

Vergleich mit *best guess*-Szenario:

Wirkungspotential: 10% niedriger
 Investitionskosten Tunnel: Kostenrückgang um 5% statt 10% in 10 Jahren, Ausrüstungsrate um 10% geringer
 Investitionskosten Pkw: Kostenrückgang um 15% statt 30% in 10 Jahren, Ausrüstungsrate um 10% geringer

Tabelle XXII: Kosten und Wirksamkeit Intelligent Speed Adaptation, *worst case*-Szenario

Jahr	Anteil ausgerüstete Tunnel kumuliert	Neuausrüstung pro Jahr	Anteil ausgerüstete Pkw pro Jahr	Verbundene Ausrüstungsrate von Tunnel und Pkw	Getötete im <i>Ohne-Fall</i>	Vermeidung Getötete im <i>Mit-Fall</i>	Vermeidung in Abhängigkeit von der Ausrüstungsrate	jährliche Investitionskosten Tunnel	jährliche Investitionskosten Pkw
2009	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4	2,72	0,00	0 €	0 €
2010	2,3%	2,3%	0,1%	0,0%	4	2,72	0,00	4.945 €	1.013.068 €
2011	4,5%	2,3%	0,4%	0,0%	4	2,72	0,00	4.917 €	5.328.049 €
2012	6,8%	2,3%	1,0%	0,1%	4	2,72	0,00	4.890 €	11.205.438 €
2013	9,0%	2,3%	1,9%	0,2%	4	2,72	0,00	4.862 €	17.669.206 €
2014	11,7%	2,7%	3,0%	0,4%	4	2,72	0,01	5.801 €	24.757.924 €
2015	14,4%	2,7%	4,4%	0,6%	4	2,72	0,02	5.768 €	32.511.655 €
2016	17,1%	2,7%	6,0%	1,0%	4	2,72	0,03	5.735 €	40.971.911 €
2017	19,8%	2,7%	7,8%	1,5%	4	2,72	0,04	5.702 €	50.181.572 €
2018	22,5%	2,7%	9,8%	2,2%	4	2,72	0,06	5.669 €	60.184.799 €
							Summe = 0,16	Summe = 48.289 €	Summe = 243.823.621 €

A4.7. Barwerte der Systeme im *worst case*

Tabelle XXIII: Barwerte Moving Spot Light System und Section Control, *worst case*

System	Jahr	Periode	Nutzen	Investitionskosten Tunnel pro Jahr	Barwert bezogen auf 2009
Moving Spot Light System	2009	1	0,00	0 €	0 €
	2010	2	0,03	1.028.534 €	932.911 €
	2011	3	0,06	1.022.788 €	883.523 €
	2012	4	0,09	1.017.042 €	836.723 €
	2013	5	0,16	2.022.592 €	1.584.754 €
	2014	6	0,25	3.016.650 €	2.251.071 €
	2015	7	0,34	2.999.412 €	2.131.626 €
	2016	8	0,44	2.982.174 €	2.018.453 €
	2017	9	0,53	2.964.936 €	1.911.224 €
	2018	10	0,63	2.947.698 €	1.809.631 €
	Summen:		2,53	20.001.826 €	14.359.915 €
Section Control	2009	1	0,04	0 €	0 €
	2010	2	0,08	1.653.960 €	1.500.190 €
	2011	3	0,13	1.644.720 €	1.420.771 €
	2012	4	0,17	1.635.480 €	1.345.513 €
	2013	5	0,21	1.626.240 €	1.274.202 €
	2014	6	0,28	2.425.500 €	1.809.945 €
	2015	7	0,34	2.411.640 €	1.713.908 €
	2016	8	0,40	2.397.780 €	1.622.912 €
	2017	9	0,47	2.383.920 €	1.536.696 €
	2018	10	0,53	2.370.060 €	1.455.011 €
	Summen:		2,65	18.549.300 €	13.679.149 €

Tabelle XXIV: Barwerte I2C-Abstandswarnung und Intelligent Speed Adaptation, worst case

System	Jahr	Periode	Nutzen	Investitionskosten Tunnel pro Jahr	Investitionskosten Pkw pro Jahr	Summe der Investitionskosten pro Jahr	Barwert bezogen auf 2009
I2C-Abstands-warnung	2009	1	0,00	0 €	0 €	0 €	0 €
	2010	2	0,00	54.394 €	0 €	54.394 €	49.337 €
	2011	3	0,00	54.090 €	0 €	54.090 €	46.725 €
	2012	4	0,00	53.786 €	0 €	53.786 €	44.250 €
	2013	5	0,00	53.482 €	0 €	53.482 €	41.905 €
	2014	6	0,00	63.814 €	4.426.417 €	4.490.230 €	3.350.679 €
	2015	7	0,00	63.449 €	9.311.980 €	9.375.429 €	6.662.943 €
	2016	8	0,01	63.084 €	14.688.043 €	14.751.128 €	9.984.144 €
	2017	9	0,02	62.720 €	20.587.311 €	20.650.031 €	13.311.194 €
	2018	10	0,03	62.355 €	27.043.823 €	27.106.178 €	16.640.842 €
	Summen:	0,06		531.174 €	76.057.575 €	76.588.748 €	50.132.018 €
Intelligent Speed Adaptation	2009	1	0,00	0 €	0 €	0 €	0 €
	2010	2	0,00	4.945 €	1.013.068 €	1.018.013 €	923.367 €
	2011	3	0,00	4.917 €	5.328.049 €	5.332.966 €	4.606.817 €
	2012	4	0,00	4.890 €	11.205.438 €	11.210.328 €	9.222.764 €
	2013	5	0,00	4.862 €	17.669.206 €	17.674.068 €	13.848.095 €
	2014	6	0,01	5.801 €	24.757.924 €	24.763.725 €	18.479.073 €
	2015	7	0,02	5.768 €	32.511.655 €	32.517.423 €	23.109.526 €
	2016	8	0,03	5.735 €	40.971.911 €	40.977.646 €	27.735.283 €
	2017	9	0,04	5.702 €	50.181.572 €	50.187.273 €	32.351.164 €
	2018	10	0,06	5.669 €	60.184.799 €	60.190.468 €	36.951.726 €
	Summen:	0,16		48.289 €	243.823.621 €	243.871.910 €	167.227.815 €

A5. Kosten-Wirksamkeitsverhältnis der kooperativen Systeme

In den folgenden beiden Tabellen ist aufgeführt, welches Kosten-Wirksamkeitsverhältnis sich für I2C-Abstandswarnung und Intelligent Speed Adaptation in Abhängigkeit von den Kosten der Pkw-Ausrüstung einstellt. Tabelle XXV zeigt die Berechnungen für das *best case*-, Tabelle XXVI für das *best guess*-Szenario. Zum Vergleich sind die Werte für Moving Spot Light System und Intelligent Speed Adaptation angegeben.

Tabelle XXV: Kosten-Wirksamkeitsverhältnis in Abhängigkeit von den Kosten der Pkw-Ausrüstung im *best case*-Szenario

System	Kosten pro Pkw	Barwert	Wirksamkeit	Kosten-Wirksamkeitsverhältnis
Moving Spot Light System	0 €	17.990.293	4,26	4,2 Millionen Euro pro Menschenleben
Section Control	0 €	17.329.472	4,50	3,9 Millionen Euro pro Menschenleben
I2C-Abstands-warnung	200 €	40.446.177	4,06	10,0 Millionen Euro pro Menschenleben
	150 €	30.460.747	4,06	7,5 Millionen Euro pro Menschenleben
	100 €	20.475.318	4,06	5,0 Millionen Euro pro Menschenleben
	78 €	16.081.729	4,06	4,0 Millionen Euro pro Menschenleben
	75 €	15.482.604	4,06	3,8 Millionen Euro pro Menschenleben
	50 €	10.489.889	4,06	2,6 Millionen Euro pro Menschenleben
	25 €	5.497.174	4,06	1,4 Millionen Euro pro Menschenleben
	0 €	504.460 €	4,06	124.251 Euro pro Menschenleben
Intelligent Speed Adaptation	300 €	104.073.835 €	4,73	22,0 Millionen Euro pro Menschenleben
	250 €	86.735.839 €	4,73	18,3 Millionen Euro pro Menschenleben
	200 €	69.397.844 €	4,73	14,7 Millionen Euro pro Menschenleben
	150 €	52.059.848 €	4,73	11,0 Millionen Euro pro Menschenleben
	100 €	34.721.852 €	4,73	7,3 Millionen Euro pro Menschenleben
	75 €	26.052.854 €	4,73	5,5 Millionen Euro pro Menschenleben
	55 €	19.117.655 €	4,73	4,0 Millionen Euro pro Menschenleben
	50 €	17.383.856 €	4,73	3,7 Millionen Euro pro Menschenleben
	25 €	8.714.858 €	4,73	1,8 Millionen Euro pro Menschenleben
	0 €	45.860 €	4,73	9.696 Euro pro Menschenleben

Tabelle XXVI: Kosten-Wirksamkeitsverhältnis in Abhängigkeit von den Kosten der Pkw-Ausrüstung im *best guess*-Szenario

System	Kosten pro Pkw	Barwert	Wirksamkeit	Kosten-Wirksamkeitsverhältnis
Moving Spot Light System	0 €	15.434.385 €	3,12	4,9 Millionen Euro pro Menschenleben
Section Control	0 €	14.753.895 €	3,25	4,5 Millionen Euro pro Menschenleben
I2C-Abstands-warnung	200 €	46.899.131 €	0,09	521,1 Millionen Euro pro Menschenleben
	150 €	35.281.375 €	0,09	392,0 Millionen Euro pro Menschenleben
	100 €	23.663.618 €	0,09	262,9 Millionen Euro pro Menschenleben
	75 €	17.854.739 €	0,09	198,4 Millionen Euro pro Menschenleben
	50 €	12.045.861 €	0,09	133,8 Millionen Euro pro Menschenleben
	25 €	6.236.983 €	0,09	69,3 Millionen Euro pro Menschenleben
	0 €	428.104 €	0,09	4,8 Millionen Euro pro Menschenleben
Intelligent Speed Adaptation	300 €	146.176.100 €	0,22	664,4 Millionen Euro pro Menschenleben
	250 €	121.819.903 €	0,22	553,7 Millionen Euro pro Menschenleben
	200 €	97.463.706 €	0,22	443,0 Millionen Euro pro Menschenleben
	150 €	73.107.509 €	0,22	332,3 Millionen Euro pro Menschenleben
	100 €	48.751.312 €	0,22	221,6 Millionen Euro pro Menschenleben
	75 €	36.573.214 €	0,22	166,2 Millionen Euro pro Menschenleben
	50 €	24.395.116 €	0,22	110,9 Millionen Euro pro Menschenleben
	25 €	12.217.017 €	0,22	55,5 Millionen Euro pro Menschenleben
	2 €	1.013.166 €	0,22	4,6 Millionen Euro pro Menschenleben
	0 €	38.919 €	0,22	176.902 Euro pro Menschenleben

A6. Unfälle im Mont Blanc-, Tauern- und St. Gotthard-Tunnel

Die Sicherheit von Straßentunneln ist vor allem durch die drei schweren Unfälle im Tauern-, Mont Blanc- und St. Gotthard-Tunnel, die sich 1999 bzw. 2001 ereigneten, ins Bewusstsein der Öffentlichkeit gerückt. Diese Ereignisse werden im Folgenden beschrieben.

A6.1. Mont Blanc

Der Mont Blanc-Tunnel verläuft zwischen Frankreich und Italien und hat eine Länge von 11,6 km. Im März 1999 geriet ein Lkw in Brand, konnte seine Fahrt nicht fortsetzen und musste noch innerhalb des Tunnels stoppen. Die Brandlast des Lkw war sehr hoch, da er mit Mehl und Margarine beladen war. Das Feuer konnte erst nach ca. 50 Stunden gelöscht werden und die Folgen waren verheerend: 39 Menschen starben, 34 Fahrzeuge brannten aus.

Die Brandursache ist nicht mit Sicherheit geklärt. Es wird vermutet, dass eine glühende Zigarettenkippe den Luftfilter des Lkw in Brand steckte. Der Hersteller des betreffenden Lkw bezweifelt diese Theorie und geht davon aus, dass ein durch den Unfall bedingtes Ölleck das Feuer verursacht hat.⁴²³ Generell ist die etwa 20 km lange Anfahsstrecke zwischen Le Fayet und dem Mont Blanc-Tunnel für Lkw schwierig zu befahren, da sie bis zu 7 % Gefälle aufweist. Die Fahrer müssen daher ihre Fahrzeuge kontinuierlich abbremsen und die unterschiedlichen Bremssysteme angemessen einsetzen, um ein Versagen der Betriebsbremse durch zu hohe Temperaturentwicklung zu verhindern.⁴²⁴ Es ist daher auch denkbar, dass eine überhitzte Bremsanlage der Auslöser des Brandes war.

Nach dem Unfall war der Tunnel für drei Jahre gesperrt, um saniert und mit zusätzlichen Sicherheitsmaßnahmen ausgestattet zu werden. Eine betriebliche Sicherheitsmaßnahme besteht darin, dass der Mont Blanc-Tunnel vom Schwerverkehr nur noch in einer Richtung durchfahren werden darf. Verkehr in der entgegengesetzten Richtung muss den Fréjus-Tunnel, der sich etwa 90 km weiter südlich befindet, benutzen.⁴²⁵

Der Schaden, der durch diesen Unfall entstand, betrug insgesamt etwa 300 Millionen Euro.⁴²⁶

A6.2. Tauern

Der Tauern-Tunnel befindet sich in Österreich und ist 6,4 km lang. Im Mai 1999 konnte ein Lkw vor einer Baustellenampel innerhalb des Tunnels nicht mehr rechtzeitig bremsen und fuhr auf wartende Fahrzeuge auf. Darunter befand sich ein Lkw, der mit Spraylacken beladen war, die in Folge des ausbrechenden Feuers explodierten. Das Feuer entwickelte

⁴²³ Volvo Truck Corporation: Mont Blanc-Tunnel-Prozess: Die Anhörung von Volvo Trucks ist abgeschlossen. Pressemitteilung Bonneville, 2005, S. 1.

⁴²⁴ Tedard, C.; Roumegoux, J. P.; Huet, R.; Quincy, R.: Unsafe Practices of Truck Drivers in Long Grades - The Case of the Expressway on the Mont-Blanc-Le Fayet Tunnel. In: International Journal of Vehicle Design 1993, S. 63.

⁴²⁵ National Cooperative Highway Research Program: Making Transportation Tunnels Safe and Secure - NCHRP-Report 525. Washington, 2006, S. 31.

⁴²⁶ Goncalves, N.; Guarascio, M.; Hall, R. et al.: Risk Analysis for Road Tunnels - PIARC Report 2008R02. PIARC Technical Committee Road Tunnel Operation (C3.3), Défense Cedex, 2008, S. 15.

aufgrund der Lacke sehr hohe Temperaturen, was dazu führte, dass auf einer Länge von 100 m Teile der Tunneldecke einstürzten. Zwölf Menschen starben in dem Feuer, 40 Fahrzeuge brannten aus und es dauerte 16 Stunden, den Brand zu löschen.

Drei Monate nach dem Brand konnte der Tunnel wieder für den Verkehr freigegeben werden.⁴²⁷

A6.3. St. Gotthard

Der St. Gotthard-Tunnel ist die wichtigste Alpenquerung.⁴²⁸ Er befindet sich in der Schweiz und hat eine Länge von 17 km. Im Oktober 2001 verlor ein Lkw-Fahrer die Kontrolle über sein Fahrzeug, stieß gegen die Tunnelwand und geriet auf die Gegenfahrbahn. Dort kam es zu einem Frontalzusammenstoß mit einem weiteren Lkw und beide Fahrzeuge gerieten in Brand. Elf Menschen starben, 23 Fahrzeuge brannten aus, und der Brand konnte erst nach ca. 36 Stunden vollständig gelöscht werden. Der unfallverursachende Lkw hatte etwa 1.000 Reifen geladen, was zu einer großen Hitzeentwicklung führte, die den Beton der Tunneldecke abplatzen und schließlich auf einer Länge von ca. 200 m einstürzen ließ.⁴²⁹

Der Tunnel war nach dem Unglück für zwei Monate für Sanierungsarbeiten gesperrt. Mit der Wiedereröffnung traten neue betriebliche Sicherheitsregeln in Kraft: der Mindestabstand zwischen Lkw wurde auf 150 m erhöht und die Anzahl der Lkw in Abhängigkeit von der Verkehrssituation auf 60 bis 150 pro Stunde begrenzt.⁴³⁰ Außerdem wird alternierender Einbahnverkehr für den Schwerverkehr durchgeführt, d. h. es gibt für beide Befahrensrichtungen vorgegebenen Zeitperioden.⁴³¹

A6.4. Einordnung der drei Unfälle

Das Feuer im Mont Blanc-Tunnel hatte von den drei genannten Ereignissen die schlimmsten Konsequenzen, es war einer der schwersten Unfälle, die sich je in einem Straßentunnel ereignet haben.⁴³² Verschiedene Ursachen sind für den schwerwiegenden Verlauf verantwortlich: Zum einen lag der Unglücksort im Mont Blanc etwa in der Mitte des 11,6 km langen Tunnels, während es im Tauern und St. Gotthard in der Nähe eines Portals zum Unfall kam. Im Mont Blanc lagen außerdem die Notausgänge relativ weit auseinander und wurden von den Autofahrern nicht oder erst zu spät aufgesucht. Viele Menschen, die bei diesem Unfall ums Leben kamen, wurden in ihren Fahrzeugen oder deren Nähe gefunden, da sie die Gefahr unterschätzt und sich nicht sofort auf den Weg zu den Notausgängen gemacht hatten oder nicht bereit gewesen waren, ihre Fahrzeuge zu-

⁴²⁷ Münchner Rück: Risk Management Tunnel. München, 2003, S. 10.

⁴²⁸ Steiner, W.: Betriebsorganisation Gotthard Strassentunnel. 4. Internationaler Fachkongress Verkehr und Sicherheit in Straßentunneln, 25.-27. April 2007 in Hamburg, S. 2.

⁴²⁹ Steiner, W.: Gotthard Strassentunnel - Auszug aus dem Jahresbericht 2001. 2. Internationaler Fachkongress Verkehr und Sicherheit in Straßentunneln, 19.-21. Mai 2003 in Hamburg, S. 2.

⁴³⁰ National Cooperative Highway Research Program: Making Transportation Tunnels Safe and Secure - NCHRP-Report 525. Washington, 2006, S. 22.

⁴³¹ Steiner, W.: Gotthard Strassentunnel, a. a. O., S. 1+5.

⁴³² Vgl. ADAC: Chronologie: Schwere Tunnelunfälle seit 1971.

http://www.adac.de/Tests/Mobilitaet_und_Reise/Tunnel/testjahr_2008/chronologie/default.asp?Com%20ponentID=214778&SourcePageID=212840, abgerufen am 4. Dezember 2008.

rückzulassen.⁴³³ Als sich nur wenige Wochen später das Unglück im Tauern-Tunnel ereignete, sorgten deutlich mehr der anwesenden Autoinsassen für eine schnelle Selbstrettung, was ein Grund ist, warum bei diesem zweiten Unglück weniger Menschen zu Schaden kamen.

Im Mont Blanc-Tunnel kamen Fehler bei der Koordination der Rettungsaktionen hinzu, da der Mont Blanc zu jenem Zeitpunkt noch über zwei Tunnelkontrollzentren – eines auf französischer, eines auf italienischer Seite – verfügte, die jeweils für eine Hälfte des Tunnels verantwortlich waren. Unter anderem wurden die Ventilations- bzw. Rauchabzugsstrategien nicht aufeinander abgestimmt.⁴³⁴

Während die Brandursache im Mont Blanc-Tunnel nicht sicher geklärt ist, so waren im Tauern- und St. Gotthard-Tunnel Verkehrsunfälle, wie sie auch in Kapitel 3 beschrieben werden, der Auslöser:

- Im Tauern eine Kollision mit einem stehenden Fahrzeug, das aufgrund von Unachtsamkeit o. ä. nicht rechtzeitig erkannt wurde.
- Im St. Gotthard ein Alleinunfall, der eine Kollision mit den Gegenverkehr nach sich zog.

Die verheerenden Auswirkungen der drei Unfälle wurden jedoch hauptsächlich dadurch verursacht, dass die Ladung der Lkw eine hohe Brandlast darstellte und somit zu Feuern mit sehr großer Hitze- und Rauchentwicklung führte. Zwar gibt es Gesetze und Vorschriften, die den Transport von Gefahrgut betreffen und zusätzliche Sicherheitsvorkehrungen verlangen, doch Margarine und Mehl (Mont Blanc), Lacke (Tauern) und Reifen (St. Gotthard) zählen nicht zu diesen Gütern. Die rechtzeitige Entdeckung von Bränden und ihre schnellstmögliche Bekämpfung ist daher zu Recht der Schwerpunkt der in Kapitel 2.3 dargestellten Forschungsprojekte, selbst wenn sie statistisch gesehen nur sehr selten vorkommen.⁴³⁵

⁴³³ Voeltzel, A.; Dix, A.: A Comparative Analysis of the Mont Blanc, Tauern and Gotthard Tunnel Fires. In: Routes/Roads Nr. 324, World Road Association, 2004, S. 30.

⁴³⁴ Voeltzel, A.; Dix, A., a. a. O., S. 31.

⁴³⁵ Eine Untersuchung des PIARC Committee on Road Tunnels aus dem Jahr 1999 kommt zu dem Ergebnis, dass ca. 1-2 Pkw-Brände je 100 Millionen Fahrzeug-Kilometer und 1-3 schwere Lkw-Brände je 1 Milliarde Fahrzeug-Kilometer auftreten. Nach: Tetzner, D.: Sicherheit in Europas Straßentunneln. 3. Internationaler Fachkongress Verkehr und Sicherheit in Straßentunneln, 18.-20. Mai 2005 in Hamburg.

Quellenverzeichnis

Abele, J.; Kerlen, C.; Krüger, S. et al.: SEISS: Exploratory Study on the Potential Socio-economic Impact of the Introduction of Intelligent Safety Systems in Road Vehicles. Teltow, 2005.

ADAC: Abstandsmessungen. Mit Beteiligung der Sachverständigen Prof. Dr. Horst Groll und Dr.-Ing. Uwe Siart.

http://www.adac.de/images/ADAC-Abstandsuntersuchung-Bericht-M%C3%A4rz08_tcm8-212335.pdf, abgerufen am 19. April 2009.

ADAC: Chronologie: Schwere Tunnelunfälle seit 1971.

http://www.adac.de/Tests/Mobilitaet_und_Reise/Tunnel/testjahr_2008/chronologie/default.asp?ComponentID=214778&SourcePageID=212840, abgerufen am 19. November 2008.

ADAC: Empfehlungen: So können Tunnelbetreiber für Sicherheit sorgen.

http://www.adac.de/Tests/Mobilitaet_und_Reise/Tunnel/testjahr_2007/Empfehlungen/default.asp?ComponentID=179325&SourcePageID=179415, abgerufen am 24. Februar 2009.

ADAC: EU-Richtlinie: Kleine Schritte auf dem Weg zu mehr Sicherheit.

http://www.adac.de/Tests/Mobilitaet_und_Reise/Tunnel/testjahr_2007/eu_richtlinie/default.asp?ComponentID=180020&SourcePageID=179415, abgerufen am 23. Februar 2009.

ADAC: Methodik: So haben wir getestet.

http://www.adac.de/Tests/Mobilitaet_und_Reise/Tunnel/testjahr_2007/Methodik/default.asp?ComponentID=179292&SourcePageID=179415, abgerufen am 23. Februar 2009.

ADAC: Test Abstandregelsysteme: Technische Daten der getesteten Modelle.

http://www1.adac.de/images/Tabelle_Test_Abstandsregelsysteme_tcm8-245319.pdf, abgerufen am 22. Mai 2010.

Adam, D.: Investitionscontrolling. Oldenbourg, München, 2000.

Adler, S.: Wie sicher ist Fliegen?

http://flugzeuge-flugzeugtechnik.suite101.de/article.cfm/wie_sicher_ist_fliegen, abgerufen am 10. April 2010.

Adunka, R.: Rechnerunterstützter Bewertungsprozess im Umfeld methodischer Produktentwicklung. VDI Reihe 1 Nr. 362. VDI, Düsseldorf, 2003.

Ahmed-Zaid, F.; Bai, F.; Basnayake, C. et al.: Vehicle Safety Communications - Applications (VSC-A). DOT HS 811 073. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, 2008.

Amberg, F.: L-surF - Large Scale Underground Research Facility. 2nd International Symposium on Tunnel Safety and Security, 15.-17. März 2006 in Madrid.

Amberg, F.; Salvi, O.: Large Scale Experiments for Safety and Security in Tunnels and Underground Constructions - L-surF Project. 4. Internationaler Fachkongress Verkehr und Sicherheit in Straßentunneln, 25.-27. April 2007 in Hamburg.

Ameling, C.: Steigerung der aktiven Sicherheit von Kraftfahrzeugen durch ein Kollisionsvermeidungssystem. VDI Reihe 12 Nr. 510. VDI, Düsseldorf, 2002.

Ariva.de: Aktueller EUR/USD-Wechselkurs.

<http://www.ariva.de/euro-dollar-kurs>, abgerufen am 5. Januar 2010.

ASFINAG: Die Straße spricht mit dem Fahrzeug und kommuniziert Informationen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit. Pressemitteilung zum Projekt COOPERS.

<http://www.asfinag.at/index.php?module=Pagesetter&func=viewpub&tid=329&pid=22>, abgerufen am 14. März 2010.

Assing, K.; Baum, H.; Bühne, J. et al.: eIMPACT: Methodological Framework and Database for Socio-economic Evaluation of Intelligent Vehicle Safety Systems. Deliverable D3, 2006.

Auerbach, H.; Issing, M.; Karrer, K. et al.: Fahrzeuggestützte Notrufsysteme (eCall) für die Verkehrssicherheit in Deutschland. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Heft F 69. Wirtschaftsverlag NW, Bergisch-Glattbach, 2008.

Baum, H.; Geißler, T.; Westerkamp, U. et al.: eIMPACT: Cost-benefit Analyses for Stand-alone and Co-operative Intelligent Vehicle Safety Systems. Deliverable D6, 2008.

- Baum, H.; Höhnscheid, K.: Volkswirtschaftliche Kosten der Personenschäden im Straßenverkehr. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Heft M 102. Wirtschaftsverlag NW, Bergisch-Glatbach, 1999.
- Bergmeister, K.; Francescon, S.: UPTUN Report, Comprehensive Inventory of Tunnel Safety Features. 2004.
- Bickel, P.; Burgess, A.; Hunt, A.: HEATCO: Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment. Deliverable 2 Draft 1.9, 2005.
- Birkhofer, H.; Kloberdanz, H.: Produktentwicklung I. Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente, Technische Universität Darmstadt, 2005.
- Blanke, B.: Modernes Management für die Verwaltung. Pinkvoss, Hannover, 2005.
- Böhm, H.; Schneider, W.: Verkehrsteilnehmergruppen und Verkehrserziehungsmittel. Forschungsgemeinschaft "Der Mensch im Verkehr", Köln, 1965.
- Breiting, A.; Knosala, R.: Bewerten technischer Systeme. Springer, Berlin, 1997.
- Brignolo, R.: Infrastructure/Vehicle Communication. 2nd Symposium Safe and Reliable Tunnels - Innovative European Achievements, 30.-31. Mai 2006 in Lausanne.
- Brignolo, R.; Savio, W.: The Safe Tunnel System. 12th International Symposium ATA EL, 16.-18. Juni 2004 in Parma.
- Brockmann, S.: ESP-Verfügbarkeit. Eine Untersuchung der Unfallforschung der Deutschen Versicherer. 7. September 2006 in Boxberg.
- Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): ROSEBUD: Final Report. Deliverable WP4, 2005.
- Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): ROSEBUD: Road Safety and Environmental Benefit-Cost and Cost-Effectiveness Analysis for Use in Decision-Making. Report "State of the Art". Deliverable D2, 2003.
- Bundesverband deutscher Banken: US-Dollar/Euro-Wechselkurs seit Anfang 2007. <http://www.bankenverband.de/pic/artikelpic/012008/2-1-2-1-IV-07-Wechselkurse.pdf>, abgerufen am 5. Januar 2010.
- Bundesverfassungsgericht: Hessische und schleswig-holsteinische Vorschriften zur automatisierten Erfassung von Kfz-Kennzeichen nichtig. Urteil vom 11. März 2008: 1 BvR 2074/05; 1 BvR 1254/07. Pressemitteilung Nr. 27/2008, 2008.
- Busch, S.: Entwicklung einer Bewertungsmethodik zur Prognose des Sicherheitsgewinns ausgewählter Fahrerassistenzsysteme. VDI Reihe 12 Nr. 588. VDI, Düsseldorf, 2005.
- CAMP Vehicle Safety Communications Consortium: Vehicle Safety Communications Project (VSC) Task 3 Final Report. Identify Intelligent Vehicle Safety Applications Enabled by DSRC. DOT HS 809 859. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, 2006.
- Car 2 Car Communication Consortium: Manifesto. Overview of the C2C-CC System. http://www.car-to-car.org/fileadmin/downloads/C2C-CC_manifesto_v1.1.pdf, abgerufen am 09. Januar 2010.
- Carsten, O.; Fowkes, M.: External Vehicle Speed Control: Executive Summary of Project Results. Deliverable EVSC-Exec3, 2000.
- Carsten, O.; Tate, F.: Intelligent Speed Adaptation: Accident Savings and Cost-Benefit Analysis. In: Accident Analysis and Prevention Bd. 37, Nr. 3, 2005. S. 407-416.
- Centro Recherche Fiat: Safe Tunnel: Innovative Systems and Frameworks for Enhancing of Traffic Safety in Road Tunnels. <http://www.crfproject-eu.org>, abgerufen am 03. März 2009.
- Christ, R.; Smuc, M.; Gatscha, M. et al.: Analyse von Tunnelgestaltungselementen - Zusammenfassender Bericht aus Befragung und Befahrung. Kuratorium für Verkehrssicherheit, Institut für Verkehrspsychologie, Wien, 2002.
- COMeSafety: A EU Specific Support Activity. http://comesafety.org/uploads/media/COMeSafety_DEL_D02_Project_Presentation_01.pdf, abgerufen am 9. Januar 2010.
- COMeSafety: Newsletter for European ITS Related Research Projects. Issue 6, 2008.

- Continental: Sicherheitsstudie 2007.
http://www.conti-online.com/generator/www/com/de/continental/portal/themen/hidden/presse_services/sicherheitsoffensive/mediendienst/md_2007_05_04_1_de.html, abgerufen am 1. Februar 2010.
- COOPERS: Co-operative Systems for Intelligent Road Safety.
<http://www.coopers-ip.eu>, abgerufen am 23. Januar 2010.
- CVIS: Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems.
<http://www.cvisproject.org/en/home.htm>, abgerufen am 18. April 2009.
- Daimler: Fußgängerschutz in der neuen E-Klasse. Pressemeldung vom 12.11.2008
<http://media.daimler.com/dcmedia/>, abgerufen am 09. Dezember 2008.
- D'Alessio, C.; Matarese, F.; Neri, I.: SafeT Work Package 4 Part I: Tunnel Accident Data and Review of Accident Investigation Methodologies. 2005.
- DARTS: Durable and Reliable Tunnel Structures.
http://cordis.europa.eu/data/PROJ_FP5/ACTIONeqDnd_SESSIONeq112242005919ndDOCe696ndTBLeqEN_PROJ.htm, abgerufen am 24. August 2008.
- Deutsche Akademie für Verkehrswissenschaft e. V.: Empfehlungen des 47. Deutschen Verkehrsgerichtstags. 28.-30. Januar 2009 in Goslar.
- Die Welt: Diese Autos machen den meisten Ärger. Die ADAC-Pannenstatistik
<http://www.welt.de/motor/article3565263/Diese-Autos-machen-den-meisten-Aerger.html>, abgerufen am 10. Oktober 2009.
- Dingus, T. A.; Klauer, S. G.; Neale, V. L. et al.: The 100-Car Naturalistic Driving Study. Phase II: Results of the 100-Car Field, DOT HS 810 593. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, 2006.
- DMR Consulting: REACT: Sensing Traffic Together. An Industry Survey on REACT System Potential Impact. DMR Consulting, 2005.
- Donges, E.: Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. In: Automobil-Industrie 2/82, 1982. S. 183-190.
- Duden: Deutsches Universalwörterbuch. 4. Auflage. Dudenverlag, Mannheim, 2001.
- Dutch Ministry of Transport: ISA Tilburg, Field Experiment Intelligent Speed Adaptation. Final Report. Rotterdam, 2001.
- Elvik, R.; Veisten, K.: ROSEBUD: Road Safety and Environmental Benefit-Cost and Cost-Effectiveness Analysis for Use in Decision-Making. Report "Barriers to the Use of Efficiency Assessment Tools in Road Safety Policy". Deliverable D4, 2004.
- Enke, M.: Collision Probability Related to the Shift Forward of Driver Reaction. 7th International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, 5.-8. Juni 1979 in Washington.
- eSafety Forum: Final Report and Recommendations of the Implementation Road Map Working Group. Brüssel, 2005.
- European Commission (Hrsg.): Use of intelligent systems in vehicles. Special Eurobarometer 267. 2006.
- European Commission Directorate General Energy and Transport: Cost-benefit Assessment and Prioritisation of Vehicle Safety Technologies. Final Report. 2006.
- European Road Safety Observatory: Annual Statistical Report, Based on Data from CARE/EC. 2008.
- European Tunnel Assessment Programme: EuroTAP for Safe Tunnels - Quality, Safety, Mobility.
- European Tunnel Assessment Programme: Tunnel Audit - Final Report. München, 2007.
- Fancher, P.; Ervin, R.; Sayer, J. et al.: Intelligent Cruise Control Field Operational Test, DOT HS 808 849. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, 1998.
- Federrath, H.: Sicherheit in automobilen ad-hoc Netzen. Lehrstuhl für Management der Informationssicherheit, Universität Regensburg, 2009.
- Fiat Engineering: Moving Spot Light System. Safe Tunnel, 1st Workshop, 12. Dezember 2002.

Fiat Engineering: Moving Spotlight System. Abschlusspräsentation der europäischen Projekte Safe Tunnel und Sirtaki im Rahmen des Forums Safety in Road and Rail Tunnels, 20.-21. Dezember 2004 in Turin.

FIT: Fire in Tunnels. <http://www.etnfit.net/>, abgerufen am 18. November 2008.

Flø, M.; Jenssen, G.: Drivers' Perception of Long Tunnels - Studies from the Quinling Shongan Tunnel in China as well as the Lærdal Tunnel and the World Longest Sub Sea Tunnel (Rogfast) in Norway. 4. Internationaler Fachkongress Verkehr und Sicherheit in Straßentunneln, 25.-27. April 2007 in Hamburg.

Focus Marktanalysen: Der Markt der Mobilität. Daten, Fakten, Trends. 2008.

Focus online: Preis von Neuwagen erstmals seit Jahren gesunken.
http://www.focus.de/finanzen/news/auto-preis-von-neuwagen-erstmals-seit-jahren-gesunken_aid_437498.html, abgerufen am 11. Oktober 2009.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (Hrsg.): Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Linienführung (RAS-L). FGSV-Nr. 296. Köln, 1999.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (Hrsg.): Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT). FGSV-Nr. 339. Köln, 2006.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Merkblatt für die Auswertung von Straßenverkehrsunfällen.

Fritsch, M.; Wein, T.; Ewers, H.: Marktversagen und Wirtschaftspolitik. Mikroökonomische Grundlagen staatlichen Handelns. Vahlen, München, 2007.

Fuchs, S.; Bankosegger, D.; Sladek, O. et al.: COOPERS: Market and User Assessment. Deliverable D11-B-IR 2600/2700-2, 2007.

Goncalves, N.; Guarascio, M.; Hall, R. et al.: Risk Analysis for Road Tunnels - PIARC Report 2008R02. PIARC Technical Committee Road Tunnel Operation (C3.3), Défense Cedex, 2008.

Goodwin, F.; Achterberg, F.; Beckmann, J.: Intelligent Speed Assistance - Myths and Reality. European Transport Safety Council Position on ISA. Brüssel, ohne Jahresangabe.

Graf von der Schulenburg, J.; Greiner, W.: Gesundheitsökonomik. Mohr Siebeck, Tübingen, 2000.

Grawenhoff, S.: Ökonomische Bewertung von Fahrerassistenzsystemen. Methodische Grundlagen und empirische Analysen am Beispiel der Stau- und Querführungsassistenz. Herbert Baum (Hrsg.): Buchreihe des Instituts für Verkehrswissenschaft an der Universität zu Köln Nr. 62. Verkehrsverlag Fischer, 2006.

Greiner, W.: Die Berechnung von Kosten und Nutzen. In: Schöffski, O.; Graf von der Schulenburg, J. (Hrsg.): Gesundheitsökonomische Evaluationen. Springer, Berlin, 2008. S. 49-63.

Greiner, W.; Schöffski, O.: Grundprinzipien einer Wirtschaftlichkeitsuntersuchung. In: Schöffski, O.; Graf von der Schulenburg, J. (Hrsg.): Gesundheitsökonomische Evaluationen. Springer, Berlin, 2008. S. 167-191.

Großklaus, R.: Neue Produkte einführen: Von der Idee zum Markterfolg. Gabler, Wiesbaden, 2008.

Gründl, M.: Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotential und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen. Dissertation, Universität Regensburg, 2005.

Grunnan, T.; Vaa, T.; Ulleberg, P. et al.: Implications of Innovative Technology for the Key Areas in Traffic Safety: Speed, Drink Driving and Restraint Systems. Deliverable 10, Final Report, 2008.

Grupp, K.; Blümel, W. (Hrsg.): Finanzierung des Fernstraßenbaus. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Heft S 50. Wirtschaftsverlag NW, Bergisch-Gladbach, 2007.

Haack, A.: ITA-COSUF Work Programme. 2nd Symposium Safe and Reliable Tunnels - Innovative European Achievements, 30.-31. Mai 2006 in Lausanne.

Haack, A.: Welcome and Introduction. 2nd Symposium Safe and Reliable Tunnels - Innovative European Achievements, 30.-31. Mai 2006 in Lausanne.

Hannawald, L.: Multivariate Bewertung zukünftiger Fahrzeugsicherheit. VDI Reihe 12 Nr. 682. VDI, Düsseldorf, 2008.

- Höfler, F.: Verkehrswesen-Praxis. Band 1: Verkehrsplanung. Bauwerk, Berlin, 2004.
- Höpfner, U.; Hanusch, J.; Lambrecht, U.: Abwrackprämie und Umwelt - eine erste Bilanz. Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg, 2009.
- Ipsos Deutschland GmbH: Umfrage zu Schwierigkeiten im Autotunnel im Auftrag des Deutschen Verkehrssicherheitsrats e. V. - Studie Nr. 2518DZ00 (1732/1733). Hamburg, 2001.
- Jamson, S.; Carsten, O.; Chorlton, K. et al.: Intelligent Speed Adaptation: Literature Review and Scoping Study. Deliverable ISA-TfL D1, 2006.
- Kersting, W.: Gerechtigkeitsethische Überlegungen zur Gesundheitsvorsorge. In: Schöffski, O.; Graf von der Schulenburg, J. (Hrsg.): Gesundheitsökonomische Evaluationen. Springer, Berlin, 2008. S. 23-47.
- Khoury, G. A.: Actual Time Tunnel Safety - A New Approach. In: Tunnels and Tunnelling International Juli 2005, British Tunnelling Society, London, 2005. S. 46-48.
- Khoury, G. A.: EU Tunnel Fire Safety Action. In: Tunnels and Tunnelling International April 2003, British Tunnelling Society, London, 2003. S. 20-23.
- Khoury, G. A.; Horn, B. v. d.; Molag, M. et al.: SafeT Work Package 7 - Harmonised European Guidelines for Tunnel Safety - WP7.1. Global Approach to Tunnel Safety. 2006.
- Kleine, J.; Lotz, C.; Wiethoff, M. et al. (Hrsg.): IN-SAFETY: Policy Recommendations. Deliverable D5.4, 2008.
- Klümper, B.; Möllers, H.; Zimmermann, E.: Kommunale Kosten- und Wirtschaftlichkeitsrechnung. Bernhardt-Witten, Witten, 2006.
- Knoflacher, H.; Pfaffenbichler, P.; Nussbaumer, H.: Quantitative Risikoanalyse für österreichische Straßentunnel. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg.): Schriftenreihe Straßenforschung Heft 548, Wien, 2005.
- Kommission der Europäischen Gemeinschaft: Europäisches Aktionsprogramm für die Straßenverkehrssicherheit. Halbzeitbilanz. Brüssel, 2006.
- Kommission der Europäischen Gemeinschaft: Halbierung der Zahl der Unfallopfer im Straßenverkehr in der Europäischen Union bis 2010: eine gemeinsame Aufgabe bzw. Saving 20.000 lives on our roads. A shared responsibility. Brüssel, 2003.
- Kommission der Europäischen Gemeinschaft: Weißbuch: Die europäische Verkehrspolitik bis 2010 - Weichenstellungen für die Zukunft bzw. White Paper: European transport policy for 2010: time to decide. Brüssel, 2001.
- Krausmann, E.; Mushtaq, F.: SafeT Work Package 4 Part II: Analysis of Tunnel-accident Data and Recommendations for Data Collection and Accident Investigation. 2005.
- Kulmala, R.; Leviäkangas, P.; Sihvola, N. et al.: CODIA: Co-Operative systems Deployment Impact Assessment. Final Study Report. Deliverable 5, 2008.
- L'surF: Large Scale Underground Research Facility.
<http://www.l-surf.org>, abgerufen am 02. März 2009.
- Ludwig, O.: Section Control. 3. Internationaler Fachkongress Verkehr und Sicherheit in Straßentunneln, 18.-20. Mai 2005 in Hamburg.
- Macharis, C.; Verbeke, A.; De Brucker, K. et al. (Hrsg.): IN-SAFETY: Implementation Scenarios and Further Research Priorities Regarding Forgiving and Self-explaining Roads. Deliverable D5.3, 2008.
- Mankinen, E.; Anttila, V.; Penttinen, M. et al.: ADVISORS: Actors Interests, Acceptance, Responsibilities and Users' Awareness Enhancement. Deliverable D2 V1, 2001.
- Mayer, H.: Neue Anforderungen an das Technologiemanagement. Systemintegration von Mechanik und Elektronik. Meinig, Mallad, 1999.
- Mayer, S.; Pleines, R.; Branschädel, J.: Auto 2020, Billigautos erobern den Markt.
http://www.atkearney.at/content/veroeffentlichungen/whitepaper_practice.php/practice/automotive/id/50046, abgerufen am 11. Oktober 2009.
- Meckel, P.: I2V Communication in Europe. The Implementation of COOPERS Services in Austria. ITS World Congress, 17.-20. Oktober 2008 in New York.

- Moro, C.: COME2REACT Business Exploitation Model. Cooperative Communication System to Enhanced Safety and Efficiency in European Road Transport. Project Presentation, 26. Oktober 2007 in Paris.
- Müller-Merbach, H.: Betriebs- und volkswirtschaftliche Aspekte der automatischen Geschwindigkeitskontrolle von Kraftfahrzeugen. In: Topp, H. (Hrsg.): Intelligent Speed Adaptation - Expertenstatements. Fachgebiet Mobilität & Verkehr der Technischen Universität Kaiserslautern, 2004.
- Münchener Rück: Risk Management Tunnel. München, 2003.
- N. N.: Richtlinie 2002/85/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. November 2002 zur Änderung der Richtlinie 92/6/EWG des Rates über Einbau und Benutzung von Geschwindigkeitsbegrenzern für bestimmte Kraftfahrzeugklassen in der Gemeinschaft. In: Amtsblatt der Europäischen Union vom 04. Dezember 2002. S. 8-9.
- N. N.: Richtlinie 2004/54/EG des europäischen Parlaments und des Rates über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz. In: Amtsblatt der Europäischen Union vom 30. April 2004. S. 39-91.
- N. N.: Richtlinie 96/96/EC des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die technische Überwachung der Kraftfahrzeuge und Kraftfahrzeuganhänger. In: Amtsblatt der Europäischen Union vom 20. Dezember 1996.
- N. N.: Sicher durch den Tunnel? Weitere Sicherheitsmaßnahmen gefordert. In: DVR report - Fachmagazin für Verkehrssicherheit Nr. 4/2001, Bonn, 2001. S. 4-7.
- N. N.: Straßentunnel-Sicherheitsgesetz - STSG und Änderung der Straßenverkehrsordnung 1960. In: Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich Nr. 54, ausgegeben am 8. Mai 2006.
- Naab, K.: SIM-TD: Beschreibung der C2X-Funktionen. Deliverable D11.1, 2009.
- Nader, R.: Unsafe at any speed. Grossmann, New York, 1965.
- Naderer, G.; Balzer, E. (Hrsg.): Qualitative Marktforschung in Theorie und Praxis. Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Gabler, 2007.
- National Cooperative Highway Research Program: Making Transportation Tunnels Safe and Secure - NCHRP-Report 525. Washington, 2006.
- Nöcker, G.; Mezger, K.; Kerner, B.: Vorausschauende Fahrerassistenzsysteme. Workshop Fahrerassistenzsysteme, 6.-8. April 2005 in Walting.
- Oei, H. L.; Polak, P. H.: Intelligent Speed Adaptation and Road Safety. In: IATSS Research Vol. 26 Nr. 2, 2002. S. 45-51.
- Oei, H.; Wiethoff, M.; Boverie, S. et al.: ADVISORS: Inventory of ADAS and User Needs. Update 2002. Deliverable 1.2 v12.3, 2002.
- Oltersdorf, K.: Fahrerassistenzsysteme. Institut für Transportation Design, Braunschweig, 2008.
- Oltersdorf, K.; Mayer, B.: Safe Tunnel: User Needs Analysis. 1st Workshop Preventive Safety in Road Tunnels, 12. Dezember 2002 in Orbassano.
- Österreichischer Automobil- Motorrad- und Touring Club (ÖAMTC): Section Control-Anlagen in Österreich. <http://www.oeamtc.at/netautor/pages/resshp/anwendg/1103906.html>, abgerufen am 22. November 2009.
- Paine, M.; Paine, D.; Griffiths, M. et al.: In-Vehicle Intelligent Speed Advisory Systems. 20th International Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, 18.-21. Juni 2007 in Lyon.
- Pesut, A.; Smith, C.: Activities of the United Nations Economic Commission for Europe to Promote Safety in Tunnels. In: Routes/Roads Nr. 324, World Road Association, 2004. S. 82-89.
- Philosophisch-Historische Fakultät der Universität Augsburg: Atlas der Deutschen Alltagssprache. http://www.philhist.uni-augsburg.de/lehrstuehle/germanistik/sprachwissenschaft/ada/runde_4/f24a-g/, abgerufen am 20. März 2009.
- PricewaterhouseCoopers Automotive Institute: Zukunft in Bewegung. Die Automobilindustrie im Spannungsfeld zwischen neuen Chancen und alten Strukturen. Hannover/Stuttgart, 2010.

Rasmussen, J.: Human errors: A taxonomy for describing human malfunction in industrial installations. In: Journal of Occupational Accidents Nr. 4, 1982. S. 311-333.

Reason, J.: Human error. Cambridge University Press, New York, 1990.

Regan, M.; Triggs, T.; Young, K. et al.: On-road Evaluation of Intelligent Speed Adaptation, Following Distance Warning and Seatbelt Reminder Systems. Final Results of the TAC SafeCar Project. Report No. 253. Monash University Accident Research Centre, Victoria, 2006.

Ricard, F.: Résultats du projet ACTEURS sur le comportement des usagers en tunnel. 33. ASEACAP Study and Information Days, 22.-25. Mai 2005 in Wien.

Riches, I.; Webber, C.: Advanced Safety Systems - Who Wants Them, and How Much will They Pay? VDI Berichte Nr. 2000, S. 685-694. VDI, Düsseldorf, 2007.

Robatsch, K.; Nussbaumer, C.: Sicherheitsvergleich von Tunnels - Verkehrssicherheitsvergleich von Tunnels mit Gegenverkehr und Tunnels mit Richtungsverkehr mit anderen Straßenarten. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg.): Schriftenreihe Straßenforschung Heft 552, Wien, 2005.

Robatsch, K.; Nussbaumer, C.: Tunnels mit Gegenverkehr und Richtungsverkehr. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg.): Schriftenreihe Straßenforschung Heft 539, Wien, 2004.

Robert Bosch GmbH: Aktive Sicherheitssysteme helfen Unfälle zu vermeiden. <http://rb-k.bosch.de>, abgerufen am 28. Mai 2010.

SAFESPOT: Cooperative vehicles and road infrastructure for road safety. <http://www.safespot-eu.org>, abgerufen am 14. März 2010.

SafeT: Safety in Tunnels. <http://www.safetunnel.net>, abgerufen am 24. August 2008.

Sajtar, L.; Walet, F.; Wielinga, L.: Integrated Approach to Road Tunnel Safety - PIARC Report 2007R07. PIARC Technical Committee Road Tunnel Operation (C3.3), La Défense Cedex, 2007.

Sala, G.: The Control Center. Abschlusspräsentation der europäischen Projekte Safe Tunnel und Sir-taki im Rahmen des Forums Safety in Road and Rail Tunnels, 20.-21. Dezember 2004 in Turin.

Sala, G.; Carrubba, E.; Jallasse, U. et al.: Improvement of Accident Prevention in Road Tunnels Through Intelligent Infrastructures and Intelligent Vehicles Cooperation. 10th World Congress on ITS, 16.-20. November 2003 in Madrid.

Salvisberg, U.; Allenbach, R.; Cavegn, M. et al.: Verkehrssicherheit in Autobahn- und Autostrassentunneln des Nationalstrassennetzes - bfu-Report Nr. 51/2004. Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung (bfu), Bern, 2004.

SARTRE Consortium: European Drivers and Road Risk - Part 1: Report on Principle Analyses. 2004.

SARTRE Consortium: European Drivers and Road Risk - Part 2: Report on In-depth Analyses. 2004.

Sauter, R.: EuroTAP. 2nd Symposium Safe and Reliable Tunnels - Innovative European Achievements, 30.-31. Mai 2006 in Lausanne.

Scheiner, J.: Bewertungsverfahren in der Verkehrsplanung. Raum und Mobilität - Arbeitspapiere des Fachgebiets Verkehrswesen und Verkehrsplanung Nr. 9. Universität Dortmund, 2003.

Schick, B.; Büttner, R.; Baltruschat, K. et al.: Methoden zur Bewertung von Funktion und Güte von Fahrerassistenzsystemen. VDI-Tagung Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung, VDI-Berichte Nr. 1990, 21.-22. Juni 2007 in Würzburg.

Schlich, C.: Fahrerassistenzsysteme. Marktpenetrationsstrategien auf der Basis von Nutzwertanalysen. VDM Verlag Dr. Müller, Saarbrücken, 2009.

Schmidt, S.: Die Diffusion komplexer Produkte und Systeme. Ein systemdynamischer Ansatz. Gabler, Wiesbaden, 2009.

Schmidt-Kasperek, U.; Anzenberger, T.: Überwachungs-Marathon. Stern 46, 2008. S. 166.

Schöffski, O.: Datenherkunft. In: Schöffski, O.; Graf von der Schulenburg, J. (Hrsg.): Gesundheitsökonomische Evaluationen. Springer, Berlin, 2008. S. 195-200.

Schöffski, O.: Grundformen gesundheitsökonomischer Evaluationen. In: Schöffski, O.; Graf von der Schulenburg, J. (Hrsg.): Gesundheitsökonomische Evaluationen. Springer, Berlin, 2008. S. 65-94.

- Schöffski, O.; Graf von der Schulenburg, J.: Gesundheitsökonomische Evaluationen. Springer, Berlin, 2008.
- Schöffski, O.; Greiner, W.: Das Konzept der qualitätskorrigierten Lebensjahre als prominentester Vertreter der Kosten-Nutzwert-Analyse. In: Schöffski, O.; Graf von der Schulenburg, J. (Hrsg.): Gesundheitsökonomische Evaluationen. Springer, Berlin, 2008. S. 95-137.
- Schöpf, H.: Das praxisorientierte Sicherheitskonzept von Mercedes-Benz. Ohne Jahresangabe.
- Schulte-Zurhausen, M.: Organisation. Vahlen, München, 2005.
- Schwab, A.; Kleiner, A.; Eichel, K.: Autos sollen sicherer und umweltfreundlicher werden. Pressemitteilung des Europäischen Parlaments Nr. 20090309IPR51330.
http://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/infopress/20090309IPR51330/20090309IPR51330_de.pdf, abgerufen am 03. Mai 2009.
- Schweizer Forschungsstelle für Verkehrsmedizin: Sind lange Tunnelfahrten psychisch belastend? Eine Untersuchung über die Tunnelangst. In: Automobil Revue 73, Nr. 33, 1978.
- Seeck, A.; Gasser, T. M.: Klassifizierung und Würdigung der rechtlichen Rahmenbedingungen im Zusammenhang mit der Einführung moderner FAS. Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz, 04.-05. April 2006 in Garching.
- Shinar, D.; McDonald, S. T.; Treat, J. R.: The interaction between driver mental and physical conditions and errors causing traffic accidents: An analytical approach. In: Journal of Safety Research 1, Nr. 10, 1978. S. 16-23.
- Shinar, D.; Shacham, M.: Evaluation of Different Methods for Keeping a Safe Headway in a Tunnel. Safe Tunnel, 1st Workshop, 12. Dezember 2002 in Turin.
- Siegenger, W.; Träger, K.; Martin, K. et al.: Unfallgeschehen im Bereich von Streckenbeeinflussungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Verkehrsbelastung. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.): Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 787, Bonn, 2000.
- Simcic, G.: Section Control: Towards a More Efficient and Better Accepted Enforcement of Speed Limits? In: European Transport Safety Council (Hrsg.): Speed Fact Sheet Nr. 5, 2009.
- Spiegel Institut Mannheim: Sicherheitssysteme Deutschland. Studie im Auftrag der Robert Bosch GmbH. http://www.spiegel-institut.de/files/si_sicherheitssysteme.pdf, abgerufen am 18. Oktober 2009.
- Spiegel, U.; Chytka, H.: Die Automobilbranche. Produktinnovationen am Kunden entwickeln. In: Naderer, G.; Chytka, H. (Hrsg.): Qualitative Marktforschung in Theorie und Praxis. Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Gabler, 2007. S. 571-581.
- Statistik Austria: Kfz-Bestand in Österreich 2004 bis 2008.
http://www.statistik.at/web_de/statistiken/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge_-_bestand/020727.html, abgerufen am 5. Januar 2010.
- Statistik Austria: Kfz-Neuzulassungen in Österreich 2004 bis 2008.
http://www.statistik.at/web_de/statistiken/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge_-_neuzulassungen/020728.html, abgerufen am 5. Januar 2010.
- Statistisches Bundesamt: Verkehrsunfälle 2008.
<http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Statistiken/Verkehr/Verkehrsunfaelle/Tabellen/Content75/UnfaelleVerunglueckte,templateId=renderPrint.psml>, abgerufen am 10. April 2010.
- Statistisches Bundesamt: Verkehrsunfälle.
<http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Statistiken/Verkehr/Verkehrsunfaelle/Aktuell,templateId=renderPrint.psml>, abgerufen am 10. April 2009.
- Statistisches Bundesamt: Zuhause in Deutschland. Ausstattung und Wohnsituation privater Haushalte. Wiesbaden, 2009.
- Stefan, C.: Automatic Speed Enforcement on the A13 Motorway (NL). In: Bundesanstalt für Straßenwesen: ROSEBUD WP4 Final Report. Deliverable WP4, 2005. S. 44-52.
- Stefan, C.: Section Control. Automatic Speed Enforcement in the Kaisermühlen Tunnel Vienna, A22 Motorway. Bundesanstalt für Straßenwesen: ROSEBUD WP4 Final Report. Deliverable WP4, 2005. S. 24-43.

- Steierwald, G.: Stadtverkehrsplanung. Springer, Berlin, 2005.
- Steiner, W.: Betriebsorganisation Gotthard Strassentunnel. 4. Internationaler Fachkongress Verkehr und Sicherheit in Straßentunneln, 25.-27. April 2007 in Hamburg.
- Steiner, W.: Gotthard Strassentunnel - Auszug aus dem Jahresbericht 2001. 2. Internationaler Fachkongress Verkehr und Sicherheit in Straßentunneln, 19.-21. Mai 2003 in Hamburg.
- Stratil, H.: COOPERS - Co-operative Systems for Intelligent Road Safety. CVIS Cooperative Systems Workshop and Product Launch, 10.-11. Dezember 2008 in Berlin.
- Swedish National Road Administration: Results of the World's Largest ISA Trial. Publikation Nr. 2002:96. Borlänge, 2002.
- Tedard, C.; Roumegoux, J. P.; Huet, R. et al.: Unsafe Practices of Truck Drivers in Long Grades - The Case of the Expressway on the Mont-Blanc-Le Fayet Tunnel. In: International Journal of Vehicle Design 1993. S. 63-78.
- Tesson, M.; Lingelser, S.: Contributions from the Feedback on Experience to Improve Safety in Road Tunnels. 2. Internationaler Fachkongress Verkehr und Sicherheit in Straßentunneln, 19.-21. Mai 2003 in Hamburg.
- Tetzner, D.: Sicherheit in Europas Straßentunneln. 3. Internationaler Fachkongress Verkehr und Sicherheit in Straßentunneln, 18.-20. Mai 2005 in Hamburg.
- Topp, H. (Hrsg.): Intelligent Speed Adaptation - Expertenstatements. Fachgebiet Mobilität & Verkehr der Technischen Universität Kaiserslautern, 2004.
- Touring Club Schweiz: EuroTAP-Sicherheitsprüfung der europäischen Tunnel 2009. Vier einröhrige Schweizer Hauptstrassentunnel im Test. http://www.tcs.ch/etc/medialib/main/rubriken/der_tcs/presse/pdf.Par.0136.File.tmp/Bericht_EuroTAP_2009_d.pdf, abgerufen am 14. April 2010.
- Transportøkonomisk Institutt: Trafikksikkerhetshåndbok. Road Safety Handbook. <http://tsh.toi.no>. 1997.
- TUNCONSTRUCT: Tunnel Construction. <http://www.tunconstruct.org>, abgerufen am 02. März 2009.
- United Nations Economic Commission for Europe, Inland Transport Committee: Agreement Concerning the Adoption of Uniform Conditions for Periodical Technical Inspections of Wheeled Vehicles and the Reciprocal Recognition of Such Inspections. Wien, 1997.
- United Nations Economic Commission for Europe, Inland Transport Committee: Convention on Road Traffic. Wien, 1968.
- United Nations Economic Commission for Europe, Inland Transport Committee: Recommendations of the Group of Experts on Safety in Road Tunnels - UNECE-Report TRANS/AC.7/9. 2001.
- University of Michigan Transportation Research Institute and General Motors Research and Development Center: Automotive Collision Avoidance System Field Operational Test Report - Methodology and Results. DOT HS 809 900. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, 2005.
- UPTUN: Upgrading Existing Tunnels. <http://www.uptun.net>, abgerufen am 24. August 2008.
- van Arem, B.: Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems: an Intelligent Way Forward? TNO report 2007-D-R0158/B, Delft, 2007.
- Varhelyi, A.; Hjälm Dahl, M.: History and Status of ISA in Sweden. In: Topp, H. (Hrsg.): Intelligent Speed Adaptation - Expertenstatements. Fachgebiet Mobilität & Verkehr der Technischen Universität Kaiserslautern, 2004. S. 91-102.
- Virtual Fires: Virtual Real Time Emergency Simulator. <http://www.ist-world.org/ProjectDetails.aspx?ProjectId=01af430cfd9e4abdb92068afe5439bbb>, abgerufen am 24. August 2008.
- Voeltzel, A.; Dix, A.: A Comparative Analysis of the Mont Blanc, Tauern and Gotthard Tunnel Fires. In: Routes/Roads Nr. 324, World Road Association, 2004. S. 18-34.
- Vollmer, D.; Baum, H.; Fausten, M. G. T. et al.: eIMPACT: Inventory and Recommendations for In-depth Socio-economic Impact Assessment. Deliverable D2, 2006.
- Volvo Truck Corporation: Mont Blanc-Tunnel-Prozess: Die Anhörung von Volvo Trucks ist abgeschlossen. Pressemitteilung. Bonneville, 2005.

- Weiß, C.: Projekt "Sichere Intelligente Mobilität – Testfeld Deutschland". ETSI TC ITS Workshop, 4.-6. Februar 2009 in Sophia Antipolis, Frankreich.
- Welte, U.; Rock, T.; Allmirall-Bellido, J. et al.: Traffic Incident Management Systems Used in Road Tunnels. PIARC Technical Committee on Road Tunnel Operation (C5), Défense Cedex, 2004.
- Wickens, C.: Engineering psychology and human performance. HarperCollins, New York, 1992
- Wiktionary: Das freie Wörterbuch. <http://de.wiktionary.org/wiki/Tunnel>, abgerufen am 20. März 2009.
- Wilmink, I.; Rämä, P.; Lind, G. et al.: eIMPACT: Impact Assessment of Intelligent Vehicle Safety Systems. Deliverable D4, 2008.
- Wiltchko, T.: Sichere Information durch infrastrukturgestützte Fahrerassistenzsysteme zur Steigerung der Verkehrssicherheit an Straßenknotenpunkten. VDI Reihe 12 Nr. 570. VDI, Düsseldorf, 2004.
- Winner, H.: Adaptive Cruise Control. In: Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2009. S. 478-521.
- Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2009.
- Winterthur Group: Pressemitteilung: Mehr Elektronik im Auto - mehr Sicherheit im Verkehr? 2006.
- Yamamura, Y.; Seto, Y.: A Study on String-stable ACC Using Vehicle-to-Vehicle Communication. In: Society of Automotive Engineers (Hrsg.): Intelligent Vehicles & Transportation Systems. SAE International, Warrendale, 2006.
- Young, K.; Regan, M.: Intelligent Speed Adaptation: A Review. Australasian Road Safety Research, Policing and Education Conference. Sydney, 2002. S. 445-450.

Lebenslauf

Gabriele Wolf
geb. in Lindenfels

1997	Abitur
1997-2003	Technische Universität Darmstadt Studium Wirtschaftsingenieurwesen Fachrichtung Maschinenbau Abschluss als Dipl.-Wirtsch.-Ing. im Dezember 2003
2004-2009	Technische Universität Darmstadt Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Fahrzeugtechnik
2010	Abschluss der Promotion Referent: Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt (FZD) Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik der Technischen Universität Darmstadt (FGVV)